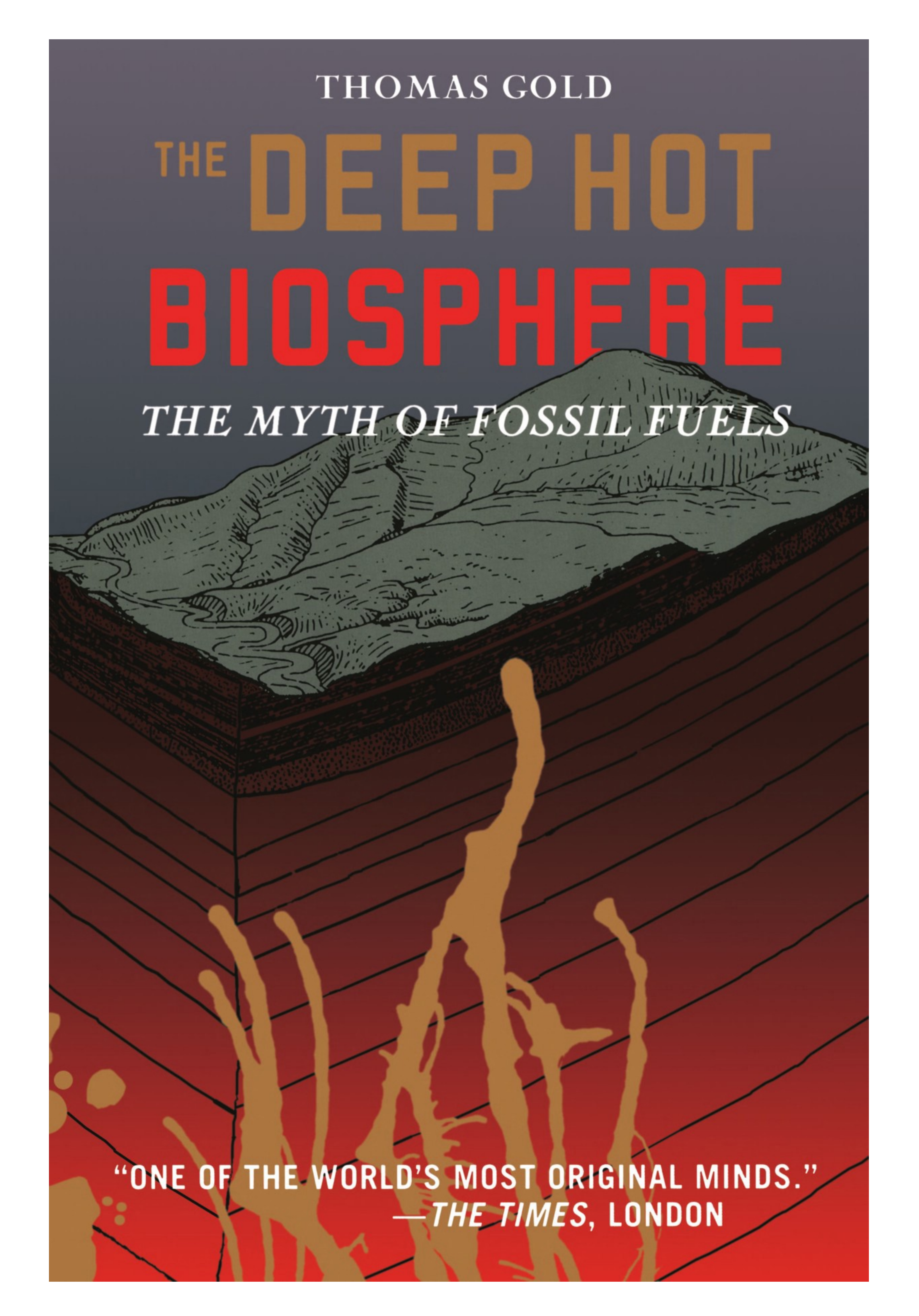

THOMAS GOLD
THE DEEP HOT
BIOSPHERE
THE MYTH OF FOSSIL FUELS
"ONE OF THE WORLD'S MOST ORIGINAL MINDS."
—THE TIMES, LONDON

Lob für Thomas Gold...

"Gold ist einer von Amerikas ikonoklastischsten Wissenschaftlern."

-Stephen Jay Gould.

"Thomas Gold ist einer der originellsten Köpfe der Welt."

-The Times, London

"Thomas Gold hätte es vielleicht schon längst satt, gegen Windmühlen zu kämpfen, wenn er nicht so viele zerstört hätte."

-USA Today

"Was wäre, wenn Ihnen jemand sagen würde, dass [die Ölkrise] völlig falsch ist und dass die Kohlenwasserstoffe, aus denen Erdöl besteht, die Reservoirs ständig wieder auffüllen. Interessiert? Nun, Sie sollten dieses Buch lesen.... Gold präsentiert seine Beweise gekonnt. Sie werden vielleicht nicht mit ihm übereinstimmen, aber Sie müssen seine frische und umfassende Herangehensweise an diese wichtigen Bereiche der Geowissenschaft…. schätzen. Dieses Buch zeigt, dass die wissenschaftliche Debatte lebendig und gut ist. Wissenschaft ist hypothesengeleitet und gedeiht durch Kontroversen – und nur wenige Menschen sind kontroverser als Thomas Gold. "

-Natur

"… Thomas Gold, ein angesehener Astronom und emeritierter Professor an der Cornell University in Ithaka, N.Y., vertritt seit Jahren die Ansicht, dass Öl in Wirklichkeit ein erneuerbarer, ursprünglicher Sirup ist, der von der Erde unter ultraheißen Bedingungen und Druck kontinuierlich hergestellt wird."

-The Wall Street Journal

"Die meisten Wissenschaftler glauben, dass das Öl, nach dem wir bohren, von zersetzten prähistorischen Pflanzen stammt. Gold glaubt, dass es seit der Entstehung der Erde da ist, dass es weit unter der Erde ein eigenes Ökosystem unterstützt und dass das Leben dort dem Leben auf der Erdoberfläche vorausging.... Wenn Gold recht hat, sind die Ölreserven des Planeten
Wenn Gold Recht hat, sind die Ölreserven des Planeten viel größer als von der Politik erwartet, und die Verfahren zur Vorhersage von Erdbeben müssen auf den Kopf gestellt werden; außerdem sollten Astronomen, die auf außerirdische Kontakte hoffen, vielleicht aufhören, nach Leben auf anderen Planeten zu suchen, und sich nach Leben in ihnen erkundigen."

-Publishers Weekly

"Golds Theorien sind immer originell, immer wichtig, und meistens richtig. Es ist meine Überzeugung, basierend auf fünfzig Jahren der Beobachtung von Gold als Freund und Kollege, dass The Deep Hot Biosphere alles von dem oben genannten ist: originell, wichtig, kontrovers und richtig."

-Freeman Dyson

"Was auch immer der Status der Theorie des aufsteigenden Gases sein mag, viele von Golds Ideen verdienen es, ernst genommen zu werden.... Die Existenz [einer tiefen heißen Biosphäre] könnte sich als eine der monumentalen Entdeckungen unseres Zeitalters erweisen. Dieses Buch dient dazu, die Dinge richtig zu stellen."

-Physics World

"Mein Wissen und meine Erfahrung mit Erdgas, die ich beim Bohren und Betreiben vieler der tiefsten und druckreichsten Erdgasbohrungen der Welt gewonnen habe, verleihen Ihren Ideen mehr Glaubwürdigkeit als die konventionellen Theorien über den biologisch-thermogenen Ursprung von Erdgas. Ihre Theorie erklärt am besten, was wir bei Tiefbohrungen tatsächlich angetroffen haben."

-Robert A. Hefner III, The GHK Companies, Oklahoma City, Oklahoma; Aus einem Brief an den Autor

"Innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft hat Gold den Ruf eines brillant-klugen Abtrünnigen, der radikale Theorien in Bereichen von der Kosmologie bis zur Physiologie aufgestellt hat."

-The Sunday Telegraph, London

"In The Deep Hot Biosphere deckt [Gold] Beweise für eine unterirdische Biosphäre auf und spekuliert darüber, wie Energie in einer Region ohne Photosynthese erzeugt werden kann. Er spekuliert über die Auswirkungen, die seine Konzepte bei der Vorhersage von Erdbeben, der Entschlüsselung der Ursprünge der Erde und der Suche nach außerirdischem Leben haben könnten."

-Science News

"Golds Theorie, wie sie in The Deep Hot Biosphere erläutert wird, bietet neue und radikale Ideen für unsere unvollständigen Vorstellungen darüber, was Erdbeben verursacht und wo wir im Weltall nach Leben suchen sollten: nicht auf Planeten, sondern in ihnen."

-Ithaka Times

"[The Deep Hot Biosphere] scheint nun durch eine wachsende Zahl von Beweisen unterstützt zu werden."

-Journal of Petroleum Technology

"Gold weiß, dass die Experten seine Überzeugung in den Wind schlagen. Das passiert Gold immer wieder. Er hat sich einen Ruf als jemand erarbeitet, der eine lange gehegte Vermutung aufgreift, eine neue Idee vorantreibt und belohnt wird, wenn die Zeit - ein oder zwei Jahrzehnte - ihm Recht gibt."

-The Juneau Empire

"Thomas Gold hat die Grundlagen der eingefahrenen konventionellen Modelle in Frage gestellt.... [The Deep Hot Biosphere] ist offensichtlich eines der umstrittensten Bücher, die in der jüngeren Geschichte veröffentlicht wurden. Es wird sicher viele Debatten auslösen, und wenn es sich als richtig erweist, wird es wahrscheinlich das Gesicht der Wissenschaft revolutionieren."

-Current Science

"[Thomas Gold] ist einer der wenigen, die trotz der Angriffe der Mittelmäßigen mutig genug sind, wissenschaftlich unkonventionell zu denken.... [Sein] Mut und seine originellen Ideen sind Lichtblicke am Horizont der Wissenschaft."

-Prof. Dr. Alfred Barth, Die Europäische Akademie der Wissenschaften und Künste, Paris

Biosphäre in der heißen Tiefe

Mythos der fossilen Brennstoffe

Thomas Gold

Mit einem Vorwort von Freeman Dyson

Maschinelle, überarbeitete Übersetzung aus dem Englischen

SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC

Erste Taschenbuch Ausgabe, 2001

Library of Congress Cataloging-in-Publication Daten
Gold, Thomas.

Die tiefe heiße Biosphäre: der Mythos der fossilen Brennstoffe / Thomas Gold; Vorwort von Freeman Dyson.
p. cm.
Mit bibliografischen Angaben und Index.
ISBN 978-0-387-95253-6
ISBN 978-1-4612-1400-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-1-4612-1400-7

1. Tiefe-Erde-Gas-Theorie.
2. Erdöl-Geologie.
3. Kohlenwasserstoffe.
4. Leben-Ursprung.
5. Extreme Umwelt Mikrobiologie.

1. Titel.

TN870.5.G66 1998
576.8'3-dc21 98-42598

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

9 8 7 6 5 4 3 2 1
ISBN 978-0-387-95253-6 SPIN 10795990

Deutsche Ausgabe:
Erschienen Dezember 2000 bei edition steinherz
ISBN 3-98073780-2 / 262 Seiten / 24,95 € + Porto

Vorwort von Freeman Dyson

Das erste Mal traf ich Tommy Gold 1946, als ich als Versuchskaninchen in einem Experiment diente, das er über die Fähigkeiten des menschlichen Ohrs durchführte. Der Mensch hat eine bemerkenswerte Fähigkeit, die Tonhöhe von musikalischen Klängen zu unterscheiden. Wir können leicht den Unterschied erkennen, wenn die Frequenz eines reinen Tons um nur 1 Prozent schwankt. Wie machen wir das? Dies war die Frage, die Gold unbedingt beantworten wollte. Es gab zwei mögliche Antworten. Entweder enthält das Innenohr eine Reihe fein abgestimmter Resonatoren, die als Reaktion auf eintreffende Töne schwingen, oder das Ohr schwingt nicht, sondern übersetzt die eintreffenden Töne lediglich direkt in neuronale Signale, die dann von einem unbekannten neuronalen Prozess in unserem Gehirn in reine Töne analysiert werden. 1946 glaubten die Experten für Anatomie und Physiologie des Ohres, dass die zweite Antwort richtig sein müsse: dass die Unterscheidung der Tonhöhe in unserem Gehirn und nicht in unseren Ohren stattfindet. Sie verwarfen die erste Antwort, weil sie wussten, dass das Innenohr ein kleiner Hohlraum ist, der mit schlaffem Fleisch und Wasser gefüllt ist. Sie konnten sich nicht vorstellen, dass die schlaffen kleinen Membranen im Ohr wie die Saiten einer Harfe oder eines Klaviers schwingen.

Gold entwarf sein Experiment, um zu beweisen, dass die Experten falsch lagen. Das Experiment war einfach, elegant und originell. Während des Zweiten Weltkriegs hatte er für die Royal Navy an Funkkommunikation und Radar gearbeitet. Er baute seine Apparatur aus überschüssiger Marineelektronik und Kopfhörern. In den Kopfhörer speiste er ein Signal ein, das aus kurzen Impulsen eines reinen Tons bestand, die durch Pausen Intervalle getrennt waren. Die stillen Intervalle waren mindestens zehnmal so lang wie die Periode des reinen Tons. Die Impulse hatten alle die gleiche Form, aber sie hatten Phasen, die unabhängig voneinander umgedreht werden konnten. Die Phase eines Impulses umzukehren bedeutet, die Bewegung des Lautsprechers im Kopfhörer umzukehren. Der Lautsprecher in einem umgekehrten Impuls drückt die Luft nach außen, während der Lautsprecher in einem nicht umgekehrten Impuls die Luft nach innen zieht. Manchmal gab Gold allen Impulsen die gleiche Phase, und manchmal wechselte er die Phasen, so dass die geraden Impulse eine Phase hatten und die ungeraden Impulse die entgegengesetzte Phase hatten. Alles, was ich tun musste, war, mit den Kopfhörern auf den Ohren zu sitzen und zuzuhören, während Gold Signale mit entweder konstanten oder wechselnden Phasen einspeiste. Dann musste ich ihm anhand des Tons sagen, ob die Phase konstant oder alternierend war.

Wenn das stille Intervall zwischen den Impulsen das Zehnfache der Periode des reinen Tons betrug, war es leicht, den Unterschied zu erkennen. Ich hörte ein Geräusch wie eine Mücke, ein Brummen und ein Summen, die zusammen erklangen, und die Qualität des Brummens änderte sich merklich, wenn die Phasen von konstant zu alternierend geändert wurden. Wir wiederholten die Versuche mit längeren Ruhepausen. Ich konnte den Unterschied immer noch feststellen, selbst wenn das stille Intervall so lang wie dreißig Perioden war. Ich war nicht das einzige Versuchskaninchen. Mehrere andere Freunde von Gold hörten sich die Signale an und berichteten von ähnlichen Ergebnissen. Das Experiment zeigte, dass sich das menschliche Ohr die Phase eines Signals, nachdem das Signal verstummt ist, für die dreißigfache Dauer des Signals merken kann. Um sich die Phase merken zu können, muss das Ohr fein abgestimmte Resonatoren enthalten, die während der Ruhepausen weiter schwingen. Das Ergebnis des Experiments bewies, dass die Tonhöhenunterscheidung hauptsächlich im Ohr und nicht im Gehirn stattfindet.

Neben dem experimentellen Beweis, dass das Ohr in Resonanz gehen kann, hatte Gold auch eine Theorie, um zu erklären, wie ein fein abgestimmter Resonator aus schlaffen und dissipativen Materialien gebaut werden kann. Seine Theorie war, dass das Innenohr ein elektrisches Rückkopplungssystem enthält. Die mechanischen Resonatoren sind an elektrische Sensoren und Treiber gekoppelt, so dass das kombinierte elektromechanische System wie ein fein abgestimmter Verstärker arbeitet. Die positive Rückkopplung, die von den elektrischen Komponenten bereitgestellt wird, wirkt der Dämpfung entgegen, die durch die Schlaffheit der mechanischen Komponenten entsteht. Golds Erfahrung als Elektroingenieur ließ ihm diese Theorie plausibel erscheinen, obwohl er die anatomischen Strukturen im Ohr, die als Sensoren und Treiber fungierten, nicht identifizieren konnte. Im Jahr 1948 veröffentlichte er zwei Arbeiten, von denen eine die Ergebnisse des Experiments wiedergab und die andere die Theorie beschrieb.

Nachdem ich selbst an dem Experiment teilgenommen und Gold bei der Erläuterung der Theorie zugehört hatte, hatte ich nie einen Zweifel daran, dass er Recht hatte. Aber die professionellen Gehörphysiologen waren sich ebenso sicher, dass er falsch lag. Sie fanden die Theorie unplausibel und das Experiment nicht überzeugend. Sie betrachteten Gold als einen unwissenden Außenseiter, der in ein Gebiet eindrang, in dem er keine Ausbildung und keine Berechtigung hatte. Jahrelang wurde seine Arbeit über das Hören ignoriert, und er wandte sich anderen Dingen zu.

Dreißig Jahre später begann eine neue Generation von Gehörphysiologen, das Ohr mit weitaus ausgefeilteren Werkzeugen zu erforschen. Sie entdeckten, dass alles, was Gold 1948 gesagt hatte, wahr war. Die elektrischen Sensoren und Treiber im Innenohr wurden identifiziert. Es handelt sich um zwei verschiedene Arten von Haarzellen, und sie funktionieren so, wie Gold es gesagt hatte. 40 Jahre nach ihrer Veröffentlichung erkannte die Gemeinschaft der Physiologen endlich die Bedeutung seiner Arbeit.

Golds Studie über den Mechanismus des Hörens ist typisch für die Art und Weise, wie er sein Leben lang gearbeitet hat. Etwa alle fünf Jahre dringt er in ein neues Forschungsgebiet ein und schlägt eine ungeheuerliche Theorie vor, die bei den Fachleuten auf dem Gebiet heftigen Widerstand hervorruft. Er arbeitet dann sehr hart daran, die Experten zu widerlegen. Das gelingt ihm nicht immer. Manchmal stellt sich heraus, dass die Experten Recht haben und er falsch liegt. Er hat keine Angst davor, falsch zu liegen. Er war berühmt falsch (oder so ist es weithin geglaubt), wenn er die Theorie eines Steady-State-Universum, in dem Materie kontinuierlich erstellt wird, um die Dichte konstant zu halten, wie das Universum expandiert gefördert. Er mag sich geirrt haben, als er davor warnte, dass der Mond eine gefährliche Oberfläche darstellen könnte, da er von einem feinen, losen Staub bedeckt ist. Es stellte sich heraus, dass er tatsächlich so bedeckt war, aber glücklicherweise gab es keine Gefahren für die Astronauten. Als sich herausstellt, dass er falsch liegt, gibt er dies mit gutem Humor zu. Wissenschaft macht keinen Spaß, sagt er, wenn man nie falsch liegt. Seine falschen Ideen sind unbedeutend im Vergleich zu seinen viel wichtigeren richtigen Ideen. Zu seinen wichtigen richtigen Ideen gehörte die Theorie, dass Pulsare, die regelmäßig pulsierenden himmlischen Radioquellen, die 1967 von Radioastronomen entdeckt wurden, rotierende Neutronensterne sind. Im Gegensatz zu den meisten seiner richtigen Ideen wurde seine Theorie der Pulsare fast sofort von der Fachwelt akzeptiert.

Eine andere von Golds richtigen Ideen wurde von der Fachwelt noch länger abgelehnt als seine Theorie des Hörens. Dies war seine Theorie der 90-Grad-Kippung der Rotationsach-

se der Erde. Im Jahr 1955 veröffentlichte er ein revolutionäres Papier mit dem Titel "Instabilität der Rotationsachse der Erde." Er schlug vor, dass die Erdachse innerhalb einer Zeitspanne von etwa einer Million Jahren gelegentlich um einen Winkel von 90 Grad umkippen könnte, so dass sich der alte Nord- und Südpol zum Äquator und zwei Punkte des alten Äquators zu den Polen bewegen würden. Ausgelöst würde der Flip durch Massenbewegungen, die dazu führen würden, dass die alte Rotationsachse instabil und die neue Rotationsachse stabil wird. z.B. könnte eine große Ansammlung von Eis am alten Nord- und Südpol einen solchen Stabilitätsaustausch verursachen. Das Papier von Gold wurde von den Experten vierzig Jahre lang ignoriert. Die damalige Fachwelt konzentrierte sich auf das Phänomen der Kontinentaldrift und die Theorie der Plattentektonik. Golds Theorie hatte nichts mit Kontinentalverschiebung oder Plattentektonik zu tun und war daher für sie uninteressant. Der von Gold vorhergesagte Flip würde viel schneller auftreten als die Kontinentalverschiebung und würde die Positionen der Kontinente zueinander nicht verändern. Der Flip würde die Positionen der Kontinente nur relativ zur Rotationsachse verändern.

1997 veröffentlichte Joseph Kirschvink, ein Experte für Gesteinsmagnetismus am California Institute of Technology, eine Arbeit, in der er den Nachweis erbrachte, dass eine 90-Grad- Kippung der Rotationsachse tatsächlich während einer geologisch kurzen Zeit im frühen Kambrium stattfand. Diese Entdeckung ist von großer Bedeutung für die Geschichte des Lebens, denn der Zeitpunkt der Drehung scheint mit der Zeit der "Kambrischen Explosion" zusammenzufallen, dem kurzen Zeitraum, in dem plötzlich alle wichtigen Arten höherer Organismen im Fossilbericht auftauchen. Es ist möglich, dass die Umkehrung der Rotationsachse tiefgreifende Umweltveränderungen in den Ozeanen verursachte und die schnelle Evolution neuer Lebensformen auslöste. Kirschvink gibt Gold das Verdienst, eine Theorie vorgeschlagen zu haben, die seinen Beobachtungen einen Sinn gibt. Wäre die Theorie nicht vierzig Jahre lang ignoriert worden, hätten die Beweise, die sie bestätigen, vielleicht schon früher gesammelt werden können.

Die umstrittenste Idee von Gold ist der nicht-biologische Ursprung von Erdgas und Erdöl. Er behauptet, dass Erdgas und Öl aus Lagerstätten tief in der Erde stammen und Relikte des Materials sind, aus dem die Erde kondensierte. Die im Öl gefundenen biologischen Moleküle zeigen, dass das Öl von Lebewesen verunreinigt ist, nicht dass das Öl von Lebewesen produziert wurde. Diese Theorie widerspricht, wie auch seine Theorien des Gehörs und des Polsprungs, dem eingefahrenen Dogma der Fachwelt. Wieder einmal wird Gold als ein Eindringling betrachtet, der das Gebiet, in das er eindringt, nicht kennt. In der Tat ist Gold ein Eindringling, aber er ist nicht unwissend. Er kennt die Details der Geologie und Chemie von Erdgas und Erdöl. Seine Argumente, die seine Theorie stützen, basieren auf einer Fülle von sachlichen Informationen. Vielleicht werden wir wieder einmal vierzig Jahre brauchen, um zu entscheiden, ob die Theorie richtig ist. Ob die Theorie des nicht-biologischen Ursprungs letztendlich als richtig oder falsch befunden wird, wird das Sammeln von Beweisen, um sie zu testen, einen großen Beitrag zu unserem Wissen über die Erde und ihre zu unserem Wissen über die Erde und ihre Geschichte beitragen.

Schließlich ist der jüngste von Golds revolutionären Vorschlägen, die Theorie der tiefen heißen Biosphäre, das Thema dieses Buches. Die Theorie besagt, dass die gesamte Erdkruste bis in eine Tiefe von mehreren Kilometern mit Lebewesen bevölkert ist. Die Lebewesen, die wir an der Oberfläche leben sehen, sind nur ein kleiner Teil der Biosphäre. Der größere und ältere Teil der Biosphäre liegt in der Tiefe und ist heiß. Die Theorie wird durch eine beträchtliche Masse an Beweisen unterstützt. Ich brauche diese Beweise hier

nicht zusammenzufassen, weil sie auf den folgenden Seiten klar dargestellt werden. Ich ziehe es vor, Gold für sich selbst sprechen zu lassen. Der Zweck meiner Bemerkungen ist nur zu erklären, wie die Theorie der tiefen heißen Biosphäre in das allgemeine Muster von Golds Leben und Arbeit passt.

Golds Theorien sind immer originell, immer wichtig, normalerweise umstritten - und normalerweise richtig. Es ist meine Überzeugung, basierend auf fünfzig Jahren der Beobachtung von Gold als Freund und Kollege, dass die tiefe heiße Biosphäre all das oben genannte ist: originell, wichtig, kontrovers - und richtig.

Vorwort

Im Juni 1997 wurde ich von der NASA gebeten, den jährlichen Vortrag am Goddard Space Flight Center in Maryland zu halten. Mein Beitrag zur Theorie der tiefen heißen Biosphäre und deren Implikationen für extraterrestrisches Leben hatte mir die Einladung eingebracht. Ich fühlte mich natürlich geschmeichelt, war aber gleichzeitig über das Thema verärgert, über das ich sprechen sollte: Leben in extremen Umgebungen. Ich hatte wenig Interesse daran, über die Oberflächenbiosphäre auf der Erde zu sprechen, und doch, wenn ich das Thema wörtlich nehmen würde, ist es genau das, worum ich gebeten wurde. Das Leben in extremen Umgebungen ist unser eigenes Leben an der Oberfläche.

Wenn es einen Gedanken gibt, von dem ich hoffe, dass er Ihnen noch lange nach der Lektüre dieses Buches in Erinnerung bleiben wird, dann ist es dieser: Wir sind es, die in den extremen Umgebungen leben. Und wenn es einen Wunsch gibt, den ich hoffentlich in Ihnen wecken kann, dann ist es die Neugier, mehr über die ersten und wahrhaft irdischen Wesen zu erfahren - die alle weit unter unseren Füßen leben, in dem, was ich die tiefe, heiße Biosphäre nenne. Leider kann ich diese Neugierde hier nur ansatzweise befriedigen, denn zum jetzigen Zeitpunkt unseres biologischen und kosmischen Verständnisses gibt es noch mehr Fragen als Antworten. Aber genau das macht die Erforschung der tiefen heißen Biosphäre so spannend.

Thomas Gold
Ithaca, New York
Dezember 1998

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Unser Garten Eden

Dieses wissenschaftliche Fach hält mehr Überraschungen für uns bereit als die Biologie. An erster Stelle steht die Überraschung, dass es überhaupt Leben gibt. Wie konnte das Leben entstehen? Hat ein außergewöhnliches, zufälliges Ereignis im Universum den ersten primitiven lebenden Organismus zusammengefügt, und ist daraus alles andere gefolgt?

Welche chemischen und physikalischen Umstände waren nötig, damit ein solch unwahrscheinliches Ereignis eintreten konnte? Bietet unsere Erde die einzigen nährenden Bedingungen? Oder (im Sinne der sogenannten "Panspermie"-Hypothese) ist das Leben irgendwo anders entstanden und hat sich durch den astronomischen Raum ausgebreitet, um an jeder fruchtbaren Stelle Wurzeln zu schlagen? Oder ist Leben gar nicht so unwahrscheinlich? Vielleicht ist Leben eine unvermeidliche Folge physikalischer Gesetze und entsteht spontan an Millionen von Orten.

Was auch immer die Antworten auf diese Fragen sein mögen, wir wissen, dass das Leben auf der Erdoberfläche eine riesige Vielfalt an Formen umfasst. Diese Formen reichen von Mikroben über Wale und Riesenpilze bis hin zu riesigen Bäumen. Sie umfassen eine unüberschaubare Anzahl von Insekten. Zählt man die ausgestorbenen Lebensformen hinzu, so erweitert sich die Vielfalt bis hin zu Dinosauriern, Trilobiten und vielem mehr.

All diese lebende Vielfalt hat viel gemeinsam. Der Aufbau aller bekannten Organismen beinhaltet komplexe Formen von Proteinmolekülen. Diese wiederum sind aus einer Reihe von Bausteinen aufgebaut, die Aminosäuren genannt werden und allen bekannten Lebensformen gemeinsam sind. Die chemische Konfiguration einiger dieser Aminosäuren könnte in zwei Formen auftreten, von denen die eine das Spiegelbild der anderen ist. Dennoch stellen wir fest, dass die ganze riesige Vielfalt des Lebens nur eine Art von jedem solchen Molekülpaar verwendet. Es scheint also einen starken Verbindungsfaden zu geben, der sich durch alle uns bekannten Lebensformen zieht.

Nicht weniger wichtig als die gemeinsamen Bausteine des Lebens sind die gemeinsamen Bedingungen, unter denen sich alle bekannten Lebensformen entwickeln und überleben können. Zu diesen Bedingungen gehören der Bedarf an Wasser im flüssigen Zustand, ein begrenzter Temperaturbereich und Energiequellen, die in chemischer Form geliefert werden (oder in diese umgewandelt werden können). Wir neigen zu der Annahme, dass diese Bedingungen am besten - und vielleicht ideal - auf der Oberfläche unseres eigenen Planeten gegeben sind. Und wir schlussfolgern, vielleicht traurig, dass diese Bedingungen mit ziemlicher Sicherheit nirgendwo sonst im Sonnensystem vorhanden sind. Aber sind diese Annahmen gültig?

Das kleine Fenster für Leben auf der Erdoberfläche

Das Universum ist ein rauer und strenger Ort, ein Reich der Extreme. Der größte Teil des Universums ist praktisch leer und sehr kalt, genauer gesagt 2,7 Kelvin oder - 270,5° Celsius, also nur 2,7°C über dem absoluten Nullpunkt. Diese enorme Kälte wird von Punkten

mit intensiver Hitze und Licht unterbrochen - den Sternen - deren Oberflächentemperaturen Millionen von Grad erreichen.

Sterne behalten ihre Leuchtkraft nicht ewig, und von ihnen stammen die Bestandteile des Lebens. Sterne, die die dreifache oder mehr Masse der Sonne haben, erlöschen in einem Rausch der Gewalt, einer Supernova-Explosion, die kurzzeitig mit der Helligkeit von hundert Milliarden Sternen aufflackern kann. Durch die Explosion wird das Sternmaterial in den Weltraum verstreut und es entstehen die kalten Wolken, aus denen sich neue Sterne bilden. Die verschiedenen Atomkerne, die im Kern des Sterns und während seiner Explosion entstehen, liefern Materialien, aus denen sich Planeten bilden können. Die gleichen stellaren Materialien liefern die Elemente, aus denen wir und alle anderen uns bekannten Lebewesen aufgebaut sind.

Das Leben ist also aus einer Vielzahl von Atomen aufgebaut, die in Kernöfen tief im Inneren von Riesensternen geschmiedet werden. Genauer gesagt, ist das Leben aus Molekülen aufgebaut, aus Ansammlungen von Atomen, die eng genug beieinander liegen und kühl genug sind, dass eine schwache Anziehungskraft sie zusammenhält. Das Innere von Sternen ist für die Bildung von Elementen geeignet, aber ihre Hitze ist zu groß für die Bildung komplexer Moleküle.

Die meisten Orte im Universum erlauben nicht die chemischen Vorgänge, die für das Leben förderlich sind. Die Sterne sind zu heiß, und die meisten anderen Orte sind so kalt, dass die Substanzen in Form eines Festkörpers oder eines Gases mit sehr geringer Dichte vorliegen, dessen chemische Aktivität äußerst langsam ist. Aber wir sehen einige Regionen im Kosmos, in denen sich viele verschiedene Arten von Molekülen gebildet haben. Das sind die großen Gaswolken im interstellaren Raum, die von Sternen, die sich in oder in der Nähe von ihnen befinden, erwärmt werden. Mit Hilfe von Radiotechniken ist es möglich, dort viele verschiedene Moleküle zu identifizieren. Wasser ist ein häufiger Bestandteil des Gases, ebenso wie Kohlenwasserstoffe - Kombinationen aus Wasserstoff und Kohlenstoff. Man nimmt an, dass sich aus dem Material solcher Wolken unser und andere Sternsysteme gebildet haben.

Damit Lebensformen entstehen und überdauern können, müssen Moleküle in einer Flüssigkeit oder einem Gas überflutet werden, so dass sanfte Kontakte zwischen den Molekülen andere Moleküle aufbauen und ein Gebräu von der Art von Komplexität erzeugen können, die wir in biologischen Materialien finden. In allen uns bekannten Ausprägungen des Lebens wird diese Beweglichkeit durch flüssiges Wasser bereitgestellt. In Anbetracht der grausamen und unfreundlichen Bedingungen des Universums - mit Punkten intensiver Hitze und riesigen Ausdehnungen strenger Kälte - würde man meinen, dass es in der Tat selten ist, dass irgendwo Oberflächentemperaturen in dem Bereich herrschen, der Wasser flüssig machen würde. Die Oberflächentemperaturen hängen nicht nur von der Sonneneinstrahlung ab, die der Planet auffängt, und damit von seiner Entfernung von der Sonne und von der Größe und Oberflächentemperatur der Sonne, sondern auch von der Masse und der Zusammensetzung der Atmosphäre des Planeten.

Die Masse und Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt maßgeblich den atmosphärischen Druck. Ohne Gasdruck gibt es so etwas wie flüssiges Wasser nicht. In Abwesenheit einer substanziellen Atmosphäre ist Wasser entweder ein Feststoff oder ein Dampf. Alles in allem ist ein Planet, der flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche bietet, ein seltenes Er-

eignis. Noch seltener wäre die Untermenge solcher Orte, die die komplizierten Designs hervorgebracht haben, die wir "Leben" nennen.

Könnte es in diesem wilden Universum Orte geben, an denen vielleicht ein kleiner Bach einen Abhang hinunterfließt, mit Bäumen, die sich sanft im Wind wiegen, und mit Lebewesen, die am Rand sitzen und die Aussicht genießen? Es scheint eine weit hergeholte Fantasie in diesem abweisenden Universum. Und doch kennen wir einen solchen Ort: unsere kleine Erde.
Wie war unser Planet in der Lage, die enorme Fülle an Oberflächenleben hervorzubringen, die wir um uns herum sehen? Keiner der anderen Planeten und keiner ihrer Monde hat etwas Vergleichbares. In der Tat, da die Oberflächen aller anderen Körper in unserem Planetensystem im Wesentlichen keine Möglichkeit für die Existenz von flüssigem Wasser bieten, ist es sehr unwahrscheinlich, dass es irgendwo in unserem Sonnensystem außer auf der Erde Oberflächenleben gibt. Vielleicht gibt es hier nur einen Garten Eden für große Lebensformen wie uns. Aber Lebewesen, die klein genug sind, um winzige Porenräume zu bevölkern, könnten durchaus in mehreren - und vielleicht vielen - anderen Planetenkörpern existieren.

Chemische Energie für unterirdisches Leben

Die Sonne bietet zwei verschiedene Möglichkeiten. Erstens ist sie die Wärmequelle, die die Oberflächentemperatur der Erde in einen Bereich bringt, der für die komplexen chemischen Reaktionen von Molekülen und damit für Leben geeignet ist. Aber die Umgebungswärme kann keine Energiequelle sein, und die Wärme unserer Oberflächenumgebung könnte keine Energiequelle für Leben an der Oberfläche darstellen. Nur ein Wärmestrom von einem heißeren Körper zu einem kühleren kann in andere Energieformen umgewandelt werden. Wir haben einen solchen Energiefluss von der heißen Oberfläche der Sonne zur kühleren Erde - die zweite Aktion, die die Sonne bietet - und diesem *Fluss* wird Energie entnommen und im Prozess der Photosynthese in chemische Energie umgewandelt.

Die Photosynthese wird heute hauptsächlich von Pflanzen und Algen durchgeführt, die das Sonnenlicht nutzen, um Wassermoleküle (H_20) und atmosphärisches Kohlendioxid (CO_2) zu dissoziieren und dann die Atome neu zu konfigurieren, um Kohlenhydrate wie $C_6H_{12}O_6$ zu erhalten, die dann je nach Bedarf wieder zu H_2O und CO_2 oxidiert ("verbrannt") werden können, um metabolische Energie zu erhalten. Dieser Prozess dient dann als die Hauptenergiequelle für alles Leben auf der Oberfläche. Eine Planetenoberfläche, auf der es kein photosynthetisches Leben gibt, wäre für alle uns bekannten Lebensformen an der Oberfläche lebensfeindlich. Unter der Oberfläche mag die Temperatur ähnlich wie an der Oberfläche sein; aber über kleine Dimensionen - wie die Größe der dort lebenden Formen - findet nur ein ganz unbedeutender Energiefluss statt. Daher kann unter der Erdoberfläche keine Energiequelle existieren.

Wenn wir jedoch den Beginn des Lebens betrachten, erkennen wir, dass in dieser Darstellung der Energieumwandlung ein Rätsel lauert. Die Photosynthese ist ein äußerst komplexer Prozess. Die Mikroorganismen, die ihn entwickelten, müssen bereits komplizierte chemische Verarbeitungssysteme besessen haben, bevor sie diese fortgeschrittene Fähigkeit erwarben. Die Energiequelle, auf die diese anfänglichen Mikroorganismen zurückgriffen, muss zunächst eine chemische gewesen sein. Die chemische Energie, die vor dem Aufkommen der Photosynthese zur Verfügung stand, konnte nicht durch Sonnenenergie

oder durch Leben erzeugt worden sein. Sie muss ein kostenloses Geschenk des Kosmos gewesen sein.

Wo genau kam diese chemische Energie her? Ich schlage vor, dass die ursprüngliche Energiequelle für das irdische Leben nicht aus der Photosynthese stammte, sondern aus der Oxidation von Kohlenwasserstoffen, die bereits vorhanden waren, so wie sie auch auf vielen anderen planetaren Körpern und in den ursprünglichen Materialien, die das Sonnensystem bildeten, vorhanden sind. Vom leichten Gas Methan bis hin zum schwersten Erdöl sind Kohlenwasserstoffe heute in der Erde in großen Mengen und in großen Tiefen vorhanden - ich glaube, viel größer und tiefer als typischerweise geschätzt wird. Diese Ansicht über die Entstehung von Kohlenwasserstoffen habe ich die *Tiefseegastheorie*[1] genannt.

Ich denke, wir haben jetzt gute Beweise dafür, dass ein sehr bedeutender Bereich des Lebens existierte und immer noch existiert, weit unterhalb der Oberflächenbiosphäre, die die Heimat der Menschen ist. Dieser unterirdische Bereich und seine Bewohner bilden das, was ich *die tiefe, heiße Biosphäre*[2] nenne - tief, weil sie sich bis zu einer Tiefe von zehn Kilometern oder mehr unter der Erdoberfläche erstrecken kann, und heiß, weil aufgrund des natürlichen Temperaturgradienten der Erde die Temperaturen in weiten Teilen dieses Bereichs 100°C erreichen und sogar überschreiten.

Die herkömmliche Vorstellung ist, dass die in der oberen Erdkruste vorhandenen Kohlenwasserstoffe ausschließlich aus pflanzlichen und tierischen Überresten stammen, die durch geologische Prozesse umgewandelt wurden - und dass Kohlenwasserstoffe daher unmöglich eine Rolle bei der Entstehung des Lebens gespielt haben können. Aber wir werden Grund haben, diese und viele andere Annahmen zu hinterfragen. Und wie wir in Kapitel 2 sehen werden, hat eine Fülle neuer Entdeckungen das Vorhandensein von Leben in diesem Bereich der Erdkruste bestätigt, und zwar unter Bedingungen, die selten zuvor für irgendeine Form von Leben als erträglich galten.

Chemische Energie wird in chemischen Reaktionen freigesetzt. Die Substanzen, die wir in unserem Oberflächenbereich als Brennstoffe bezeichnen, sind in Wirklichkeit nur eine Komponente der energieerzeugenden Reaktionen. Die andere Komponente, der Sauerstoff, ist in unserer Umgebung so reichlich vorhanden, dass wir dazu neigen, ihn zu vergessen. Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff und Kohlenstoff sind für uns nur deshalb Brennstoffe, weil die andere Komponente, die für die energieerzeugende Reaktion benötigt wird, aus den riesigen Sauerstoffvorräten, die in unserer Atmosphäre und als O_2 im Meerwasser gelöst sind, leicht verfügbar ist. Dieser Sauerstoff entsteht größtenteils, aber nicht vollständig, als Reststoff im Prozess der Photosynthese. Er stellt, anders als Erdöl oder Kohle, den fossilen Brennstoff dar, der von einer vergangenen Vegetation übrig geblieben ist.

Bevor die Photosynthese vom Leben erfunden wurde - und selbst jetzt noch in Tiefen, in die der Luftsauerstoff nicht vordringen kann - muss jedes Kohlenwasserstoff nutzende Leben auf andere Sauerstoffquellen angewiesen gewesen sein. Sauerstoff ist das zweithäufigste Element (nach Silizium) in der Erdkruste. In den Gesteinen ist also reichlich Sauerstoff vorhanden, aber das meiste davon ist zu fest gebunden, um nützlich zu sein. Es ist klar, dass Sauerstoffquellen, die mehr Energie benötigen, um den Sauerstoff aus seiner Bindung im Gestein zu lösen, als die Energie, die durch die Oxidation von Kohlenwas-

serstoffen mit ihm gewonnen wird, keine Energieversorgung für Mikroben bieten können.

Unterirdisches Leben muss daher auf Sauerstoffquellen angewiesen sein, in denen diese lebenswichtigen Atome nur schwach mit anderen Elementen gebunden sind. Die größten Quellen von schwach gebundenem Sauerstoff in der Erdkruste sind bestimmte Arten von Eisenoxiden und Sulfaten (oxidierte Schwefelverbindungen). Wenn Sauerstoff aus Eisenoxiden wie Eisen(III)-Eisen entzogen wird, hinterlässt dieser Prozess Eisen in einem niedrigeren Oxidationszustand, in dem es magnetisch ist; Beispiele sind die Minerale Magnetit und Greigit. Wenn Sauerstoff aus Sulfaten entzogen wird, kann reiner Schwefel oder Sulfide wie Schwefelwasserstoff und Eisensulfid zurückbleiben. Das Vorhandensein solcher Nebenprodukte von Stoffwechselaktivitäten im Untergrund hilft uns, die biochemischen Prozesse zu identifizieren, die stattgefunden haben. Diese Nebenprodukte geben auch einen Eindruck von der Größe und Reichweite der tiefen heißen Biosphäre.

Für die Theorie des unterirdischen Lebens ist es entscheidend, dass die ultimative Quelle der aufsteigenden Kohlenwasserstoffe sehr viel tiefer liegt als die unterste Reichweite des unterirdischen Lebens. Die tiefe heiße Biosphäre kann tief sein, aber sie darf nicht übermäßig tief sein. Warum ist das so? Die exponentiellen Wachstumsraten von Mikroben (wie von allen Lebensformen) bedeuten, dass die Energiequelle, die das Leben unterstützt, in einem dosierten Fluss ankommen muss, wo auch immer sich das Leben befindet. Wären die frühesten Formen des unterirdischen Lebens nicht durch eine Begrenzung ihres Nahrungsangebots gebremst worden, so hätte die Vermehrung ihrer Zahl in einem Augenblick geologischer Zeit sehr schnell die gesamte Menge aufgezehrt, so dass keine allmähliche Evolution hätte stattfinden können.

Energie, die vom Leben genutzt werden kann, muss also vorhanden sein, aber sie darf nicht auf einmal verfügbar sein. Der dosierte Energiefluss für die oberirdische Biosphäre wird von einer Sonne bereitgestellt, die Milliarden von Jahren braucht, um ihre eigenen endlichen Vorräte an Brennstoffen zu verbrauchen. Die chemische Energie (z. B. Zucker), die von photosynthetisierenden Lebensformen hier auf der Erde geschmiedet wird, entsteht also im Laufe der Zeit dosiert und nur in Gebieten, die über flüssiges Wasser verfügen - nicht in den trockensten Wüsten oder in den Eisfeldern der Polar- oder Hochgebirgsregionen. Die Umwandlung von Sonnen- in chemische Energie findet nun in einer Geschwindigkeit statt, die ausreicht, um alles Leben an der Oberfläche zu ernähren, das wir sehen. Aber egal wie gierig das Leben auch sein mag, die Organismen können die Sonne nicht dazu bringen, noch schneller Energie auszustrahlen. Es ist Energie, die das Leben unterstützt, aber nur ein dosierter Energiefluss erhält das Leben über einen langen Zeitraum hinweg.

Das Verständnis der Bedeutung einer dosierten Energiezufuhr für das Leben ist entscheidend für die Eingrenzung der Möglichkeiten für den Ursprung des Lebens einzugrenzen. Der oft diskutierte warme kleine Teich, der Nährstoffe enthielt, die durch Oberflächenprozesse mühsam geschmiedet wurden, ist meiner Meinung nach keine geeignete Umgebung für den Übergang von Nicht-Leben zu Leben. Eine solche Umgebung würde eine begrenzte Menge an chemischen Stoffen und Energie liefern, nicht aber eine langfristige und kontinuierliche, dosierte Versorgung. Was vielmehr benötigt wird, ist eine Umgebung, die chemische Energie in einem dosierten Fluss über Dutzende oder Hunderte von Millionen Jahren liefern kann, während derer eine unvorstellbar große Anzahl von molekularen Experimenten stattfinden könnte. liegt noch tiefer. Ich werde argumentieren, dass

sich die Photosynthese in Ablegern von unterirdischem Leben entwickelt hat, die sich zur Oberfläche hin entwickelt haben und dann einen Weg gefunden haben, Photonen zu nutzen, um noch mehr chemische Energie zu liefern. Als die Bedingungen an der Oberfläche für das Leben günstig wurden (in Bezug auf die Temperatur, das Vorhandensein von flüssigem Wasser, die Filterung der harten Komponenten der Sonnenstrahlung und die Beendigung der verheerenden Asteroideneinschläge), konnte eine große Menge an Oberflächenleben entstehen.

Eine Vorschau auf dieses Buch

In den verbleibenden Kapiteln werde ich die Theorie darlegen, dass eine voll funktionsfähige und robuste Biosphäre, die sich von Kohlenwasserstoffen ernährt, in der Tiefe der Erde existiert und dass eine primordiale Quelle von Kohlenwasserstoffen noch tiefer liegt. Ich werde argumentieren, dass sich die Photosynthese in Ablegern von unterirdischem Leben, das sich zur Oberfläche hin entwickelt hat und dann einen Weg entwickelten, Photonen zu nutzen, um noch mehr chemische Energie zu liefern. Als die Oberflächenbedingungen für das Leben günstig wurden (in Bezug auf Temperatur, das Vorhandensein von flüssigem Wasser, die Filterung der harten Komponenten der Sonnenstrahlung und das Ausbleiben von verheerenden Asteroideneinschlägen), konnte sich eine riesige Menge an Oberflächenleben entwickeln.

Rückblickend ist es nicht schwer zu verstehen, warum die wissenschaftliche Gemeinschaft typischerweise nur nach Oberflächenleben im Himmel gesucht hat. Die Wissenschaftler wurden durch eine Art "Oberflächen-Chauvinismus" behindert. Und weil die Erdwissenschaftler das Vorhandensein von chemischer Energie unter ihren Füßen nicht erkannten, konnten die Astronomen und Planetenforscher keine unterirdische Komponente in ihre Suche nach außerirdischem Leben einbauen. Leider hält sich dieses Missverständnis hartnäckig. Die Vorstellung, dass Kohlenwasserstoffe auf der Erde die chemischen Überreste von Leben an der Oberfläche sind, das längst begraben und unter Druck zu Erdöl und Erdgas verkocht wurde, ist äußerst schwer zu widerlegen. Ich versuche dies seit 1977 und entdeckte dabei, dass einige bahnbrechende russische Wissenschaftler meine Vorfahren[3] waren. Der Grund für diese anhaltende Verwirrung im Verständnis, wie Kohlenwasserstoffe entstanden sind, ist eine Geschichte für sich; ich werde sie in Kapitel 3 aufgreifen.

Solange westliche Wissenschaftler weiterhin einen biologischen Ursprung für alle terrestrischen Kohlenwasserstoffe annehmen, werden die wesentlichen Quellen der chemischen Energie der Erde nicht erkannt. Und solange diese wesentliche Nahrungsquelle unerkannt bleibt, wird auch die Aussicht, dass eine große unterirdische Biosphäre tatsächlich existieren könnte, und zwar bis in große Tiefen, keine wissenschaftliche Aufmerksamkeit erregen. Daher die besondere Bedeutung von Kapitel 3, in dem ich die Überlegungen untersuchen werde, die für die Gas- Tiefen-Theorie sprechen.

Der Oberflächenbeweis für diese Theorie folgt in Kapitel 4. Vor allem stelle ich eine Reihe von Beobachtungen vor, die überhaupt nicht durch einen sedimentären Ursprung der Kohlenwasserstoffe erklärt werden können - die starke Assoziation von Kohlenwasserstoffen mit einem Gas, das weder mit Pflanzenmaterialien noch mit Kohlenwasserstoffen chemische Wechselwirkungen eingehen kann: das inerte Element Helium. Wie kann das Erdöl nicht nur eindeutig biologische Moleküle, sondern auch ein inertes Gas aufgenommen haben, das normalerweise nur spärlich in den Gesteinen verteilt ist? Ich nenne diese

Assoziation das "Petroleum-Paradoxon". Seine Auflösung (in Kapitel 5) legt nahe, dass in den Porenräumen der Gesteine mikrobielles Leben in großer Zahl existieren muss. Meiner Ansicht nach sind Kohlenwasserstoffe keine von der Geologie überarbeitete Biologie (wie die traditionelle Sichtweise behaupten würde), sondern eher von der Biologie überarbeitete Geologie. Mit anderen Worten: Kohlenwasserstoffe sind primordial, aber während sie in die äußere Erdkruste aufsteigen, dringt mikrobielles Leben ein.

In Kapitel 6 stelle ich die beeindruckenden Ergebnisse eines groß angelegten Bohrprojekts vor, das ich in Schweden initiiert habe, um die Gas-Tiefen-Theorie zu testen und auch um nach mikrobiellem Leben in der Tiefe zu suchen. In den Kapiteln 7 und 8 versuche ich zu zeigen, wie die Gas-Tiefen-Theorie konzentrierte Vorkommen bestimmter Metallerze in der Kruste und auch wichtige Merkmale von Erdbeben erklären kann.

In den Kapiteln 9 und 10 verwende ich die Theorie der tiefen Erdgase und der tiefen heißen Biosphäre, um neue Spekulationen über die beiden vielleicht tiefsten Rätsel der biologischen Wissenschaften anzustellen: den Ursprung des irdischen Lebens und die Aussichten auf außerirdisches Leben. Als Hintergrund beginne ich mit einem Vergleich der beiden Biosphären. Worin könnten sich die Biosphäre an der Oberfläche und die tiefe Biosphäre unterscheiden, abgesehen von der einfachen Tatsache, dass die eine auf chemische Energie und die andere auf Sonnenenergie angewiesen ist? Dann gehe ich noch einmal auf die Frage nach dem Ursprung des Lebens ein und erkläre, warum ich glaube, dass das Leben an der Oberfläche der Nachkomme einer ursprünglichen Lebensform ist, die in der Tiefe begann, und nicht umgekehrt.

Wenn diese Abfolge von der Tiefe zur Oberfläche den Ursprung und die Ausbreitung des irdischen Lebens am besten erklärt, dann scheint unterirdisches Leben auf vielen anderen planetarischen Körpern sehr wahrscheinlich zu sein. Es gibt viele Körper im Sonnensystem, von denen man annimmt, dass ihre inneren Bedingungen denen unserer Erde ähnlich sind, deren Oberflächen aber nicht die außergewöhnlichen Vorteile für das Leben bieten, die die unsere hat. Es wäre in der Tat unwahrscheinlich, dass sich unterirdisches Leben ausgerechnet auf dem einen einzigen Körper entwickelt, der auch an der Oberfläche Leben beherbergen könnte. Diese Überlegung veranlasste mich 1992 zu der vorläufigen Vorhersage, dass unser eigenes Sonnensystem nicht nur eine, sondern *zehn* tiefe heiße Biosphären[4] beherbergt.

Wir Oberflächenlebewesen sind vielleicht allein im Sonnensystem, aber die Bewohner der irdischen Tiefe haben wahrscheinlich viele - möglicherweise unabhängig voneinander entwickelte - Gleichgesinnte. Erst wenn wir die Existenz einer blühenden unterirdischen Biosphäre innerhalb unseres eigenen Planeten erkennen, werden wir die richtigen Techniken lernen, um die Suche nach außerirdischem Leben in anderen planetarischen Körpern zu beginnen. Einige solcher Techniken und weitere Vorschläge für zukünftige Forschungen werden in Kapitel 10 vorgestellt.

Unsere Reise beginnt im nächsten Kapitel mit einem Blick auf die Grenzregionen zwischen den beiden Biosphären. Entlang von Hydrothermalquellen und Petroleum-Seeps im Ozean und in heißen Quellen und methanreichen Höhlen an Land begegnen wir einigen außergewöhnlichen Botschaftern aus der tiefen heißen Biosphäre. Hier können wir auch anfangen zu verstehen, warum die Tiefe für das Leben eigentlich wünschenswert sein könnte.

Kapitel 2

Leben im Grenzbereich

Im Februar und März 1977 tauchte das kleine Tiefsee-U-Boot *Alvin* am Ostpazifischen Rücken bis auf 2,6 Kilometer Tiefe ab. Diese Region, nordöstlich der Galapagos-Inseln, war als Zentrum der Meeresbodenausbreitung bekannt. Ein Forschungsschiff war im Jahr zuvor mit einer Kamera über das Gebiet gefahren und hatte die Existenz einer Reihe von Rissen im Meeresboden bestätigt, die vulkanisch aktiv zu sein schienen. Doch die Insassen von *Alvin* sahen noch viel mehr.

Weit unterhalb der tiefsten Möglichkeit für photosynthetisches Leben offenbarte der Suchscheinwerfer von *Alvin* einen Fleck auf dem Meeresboden, auf dem es von Leben wimmelte, in scharfem Kontrast zu den umliegenden Ödlandschaften. Dieser Fleck war mit dichten Gemeinschaften von Meerestieren bedeckt - einige waren für ihre Art außergewöhnlich groß. An den Felsen verankert, gediehen diese Lebewesen in dem reichen Grenzgebiet, in dem heiße Flüssigkeiten aus der Erde auf die Kälte des Meeres trafen. Neu für die Wissenschaft waren Arten von zitronengelben Miesmuscheln und weißschaligen Muscheln, die bis zu einem drittel Meter lang wurden. Am auffälligsten waren die Röhrenwürmer, die in vertikalen weißen Stängeln ihrer eigenen Herstellung lauern, aus denen leuchtend rote Kiemen herausragen. Wie die Röhrenwürmer in seichten Gewässern leben diese Bewohner der Tiefe in Gruppen zusammen, wobei die Röhren nach außen gerichtet sind, ähnlich wie die Borsten einer Bürste. Aber anders als ihre bekannteren Verwandten sind die Röhrenwürmer der Tiefe sind die Röhrenwürmer der Tiefe Riesen, die über zwei Meter lang werden können.

Weitere Untersuchungen zeigten bald, dass diese seltsame und isolierte Lebensgemeinschaft keineswegs einzigartig war. Populationen derselben Organismen wurden auch an anderen Stellen entlang dieses Meeresgrabens, an hydrothermal aktiven Schloten anderswo im Pazifik und auch im Atlantik und im Indischen Ozean entdeckt. Dies war eindeutig ein globales Phänomen. Diese unerwarteten Oasen stellen einen völlig neuen Lebensraum dar. Woher kamen diese Lebewesen? Welche Energie- und Nährstoffquellen konnten eine so erstaunliche Fruchtbarkeit und eine so lückenhafte Verteilung unterstützen?

Durch die Fenster der *Alvin* beobachtete die Entdeckercrew 1977 nicht nur seltsame Lebensformen, sondern auch Ströme von milchigen Flüssigkeiten und schwarzem "Rauch", die aus Schloten im Meeresboden aufstiegen. Diese Ströme hydrothermaler Flüssigkeiten, die erhitzt und mit Gasen und Mineralien angereichert sind, gelten heute als die Quellen chemischer Energie an der Basis der Nahrungskette der Schlotgemeinschaft. Zwei Jahrzehnte später haben wir jedoch erst begonnen zu verstehen, wie das alles funktioniert.

Da wir Oberflächenbewohner sind, nehmen wir bereitwillig die Ansicht an, dass Leben an der Oberfläche die einzig mögliche Art ist. Wir staunen über das exotische Leben an den Schloten der Tiefsee. Wir nehmen natürlich an, dass die Schlote ursprünglich von Auswanderern aus einem Ökosystem an der Oberfläche besiedelt wurden - Pioniere bei der Entwicklung von Anpassungen, die notwendig sind, um von Energie zu leben, die aus chemischen Quellen stammt und nicht in Photonen gebündelt ist, den Energieeinheiten, in denen Licht geliefert wird. Dieses Top-down-Szenario ist für die großen Tiere plausibel. Röhrenwürmer und Muscheln sind sicherlich aus flachen Gewässern nach unten gewan-

dert. Aber kein Tier, egal welcher Art, kann als Basis einer Nahrungskette dienen. Alle Tiere sind auf chemische Energie angewiesen, die in den Körpern der Organismen gespeichert ist, die sie verzehren. Es muss also schon etwas um die Meeresschlote herum gewachsen sein, als die Würmer und Muscheln ankamen.

Meines Erachtens ist es wahrscheinlicher, dass die Basis der Nahrungskette in den Tiefsee- Schloten von unten entstanden ist, als dass sie von oben herabgekommen ist. Die Mikroben (Bakterien und Archaeen), die heute das ganze komplexe Unternehmen unterstützen, sind Nachkommen von mikrobiellen Gemeinschaften, die in der Erdkruste lebten und immer noch leben. Während die großen Lebensformen nur dort existieren können, wo es einen beträchtlichen Raum für sie gibt, kommt das mikrobielle Leben, das sie ernährt, in Einheiten vor, die klein genug sind, um winzige Risse im Gestein des Meeresbodens und anderswo in der oberen Erdkruste zu bewohnen. Das Gesamtvolumen des Gesteins, das für solche Mikroben zugänglich ist, ist enorm; wie wir in Kapitel 5 sehen werden, kann der mikrobielle Inhalt der oberen Erdkruste in Masse und Volumen alles Oberflächenleben übertreffen. In der Tat sind Mikroben aus dem Bereich, den ich die tiefe heiße Biosphäre nenne, wahrscheinlich in dieses Grenzgebiet zwischen den beiden Welten - zwischen der tiefen Biosphäre und der Oberflächenbiosphäre - eingedrungen, lange bevor sich die Photosynthese an der Oberfläche entwickelte. Tatsächlich könnten die chemischen Unterschiede zwischen den beiden Welten vor dem Aufkommen der Photosynthese gering gewesen sein, denn es war die Photosynthese, die die Erdoberfläche in eine Zone verwandelte, die von freien Sauerstoffmolekülen durchdrungen war – O_2.

Energie tief unten in der Erde

Die Photosynthese ist ein äußerst komplexer Prozess, um die Energie des Lichts in chemische Energie umzuwandeln. Aber warum muss der Weg, den die Energie nimmt, chemische Formen beinhalten? Warum kann man das Sonnenlicht nicht dazu bringen, alle Prozesse, die der Organismus benötigt, direkt anzutreiben? Dafür gibt es einige zwingende Gründe. Erstens muss die Energie, die für den Betrieb des Zellstoffwechsels benötigt wird, in Schritten verfügbar sein, die nicht mehr als ein Zehntel so stark sind wie die, die von einem einzigen Sonnenphoton geliefert werden. Von einer Zelle zu erwarten, dass sie ein Photon direkt zur Synthese eines Zuckers verwendet, wäre lächerlicher als von einem Baseballspieler zu erwarten, dass er Kugeln aus einem Maschinengewehr fängt. Vielmehr hat sich das Leben einen extrem ausgeklügelten Apparat ausgedacht um die anfängliche Aufgabe des Einfangens der Kugeln zu erfüllen.

Zweitens: Ein Photon hat keine Geduld. Benutzen Sie es jetzt oder verlieren Sie es für immer. Sonnenlicht lässt sich nicht in einem Glas einfangen und in einem Regal aufbewahren. Aber seine Energie kann genutzt werden, um Moleküle wie Zucker aufzubauen, die bei der Verbindung mit Luftsauerstoff Energie liefern. Unsere Atmung demonstriert dies: Wir nehmen solche "reduzierten" (nicht oxidierten) Kohlenstoffverbindungen mit der Nahrung auf und atmen Sauerstoff ein und Kohlendioxid aus. Dies beschreibt die gesamte Stoffwechselaktivität, aber in Wirklichkeit gibt es verschiedene Zwischenstufen, die alle von der Energie abhängen, die durch die Oxidation der reduzierten Kohlenstoffverbindungen, die wir essen, letztendlich zu CO_2 bereitgestellt wird - Zucker oder andere Zwischenmoleküle können im Zellregal gespeichert werden, und die Geschwindigkeit der "Verbrennung" kann gesteuert werden. Chemische Energie hat also den Vorteil der Verfügbarkeit, sie steht in angepasster Menge zur Verfügung, wo und wann sie gebraucht wird.

Da die Photosynthese ein so komplexer Prozess ist und die aus den Photonen gewonnene Energie in chemische Energie umgewandelt werden muss, bevor die Zelle sie nutzen kann, sind Forscher, die sich mit den möglichen Ursprüngen des irdischen Lebens beschäftigen, zu der Überzeugung gelangt, dass die ersten lebenden Zellen nicht das Sonnenlicht, sondern die in der Umgebung vorhandene chemische Energie angezapft haben. Woher diese chemische Energie kam und woraus sie bestand, ist nach wie vor umstritten, aber die weit verbreitete Annahme ist, dass entweder diese ursprüngliche Energiequelle längst aufgebraucht ist oder die Bedingungen, die sie vor Milliarden von Jahren erzeugten, nicht mehr herrschen. Ich werde auf diese Frage in späteren Kapiteln zurückkommen. Für den Moment ist es nur wichtig, sich daran zu erinnern, dass es viel schwieriger wäre, eine lebende Zelle zu konstruieren, die chemische Energie aus Photonen aufbauen könnte, als eine lebende Zelle, die chemische Energie aus ihrer Umgebung aufnimmt.

Die Zellen, die diese komplexe Funktion der Photosynthese ausführen, müssen Zugang zu flüssigem Wasser haben, wie bereits erwähnt, und sie müssen Zugang zu Kohlenstoff und Stickstoff für die Herstellung von Proteinen haben, den Hauptbausteinen für ihre chemische Maschinerie. Die Sonnenenergie wird genutzt, um Verbindungen zu "reduzieren" (zu entoxidieren), die später bei der erneuten Oxidation als Energielieferanten dienen. Sauerstoff muss also ebenso zur Verfügung stehen wie Katalysatoren (Enzyme), die die Reaktionsgeschwindigkeiten und damit die Energieabgabe einleiten und steuern.

Das Leben, wie wir es kennen, hängt grundlegend von der Anwesenheit von Kohlenstoff ab; das irdische Leben wird manchmal als "kohlenstoffbasiertes Leben" bezeichnet, um es von dem theoretisch möglichen (aber unbekannten) "siliziumbasierten Leben" zu unterscheiden. Kohlenstoffatome bilden das Grundgerüst aller Proteine und des gesamten genetischen Materials aller uns bekannten Lebensformen. In der oberirdischen Biosphäre wird der Kohlenstoff durch Kohlendioxid bereitgestellt, das in geringen Anteilen in der Atmosphäre vorhanden ist. Jede der verschiedenen Varianten der Photosynthese, die das Leben entwickelt hat, beginnt mit Kohlendioxid, aus dem dann die komplexen Moleküle des Lebens geschmiedet werden. Bei der häufigsten Form der Photosynthese werden energiereiche Photonen von der Sonne eingesetzt, um Wasser zu dissoziieren und so Zugang zu Atomen zu erhalten.

Wasser zu dissoziieren und so Zugang zu Wasserstoffatomen zu erhalten. Der Wasserstoff wird dann verwendet, um das Molekül Kohlendioxid zu "reduzieren" (Sauerstoff zu entziehen). Dadurch wird unoxidierter Kohlenstoff verfügbar, der dann für Baumaterialien und für eine Vielzahl von Funktionsmaterialien, wie z. B. Proteine, verwendet werden kann. Unoxidierter Kohlenstoff kann auch zum Aufbau der verschiedenen zuckerähnlichen Substanzen (Saccharide und Polysaccharide) verwendet werden, die speicherbare Quellen für chemische Energie darstellen.

Wenn der photosynthetische Organismus stirbt und wenn die anderen Organismen, die von seinen Produkten profitiert haben, sterben, gibt der mikrobielle Zerfall alle entnommenen Materialien an die Atmosphäre zurück. Abhängig von der Art der Mikrobe, die die Zersetzung vornimmt, wird der Kohlenstoff entweder als Kohlendioxid oder als Methan (CH_4) in die Atmosphäre zurückgegeben. Da die Atmosphäre sauerstoffreich ist, wandelt sich freigesetztes Methan in einem Zeitraum von etwa zehn Jahren spontan in Kohlendioxid und Wasser um.

Was die Energiebilanz betrifft, so ist keine chemische Energie aus der Erde verbraucht worden. Kohlendioxid kehrt als Kohlendioxid zurück, und Wasser kehrt als Wasser zurück.
Es scheint also so, als ob der Kohlenstoffkreislauf in der Oberflächenbiosphäre vollständig und geschlossen ist. Wenn die Atmosphäre und das freiliegende Gestein anfangs die für das Leben erforderlichen Mengen an Rohstoffen besitzen, sollte der Prozess so lange ablaufen, wie die Sonne scheint und die Temperaturen es zulassen, dass das Wasser in einem flüssigen Zustand bleibt. Aber wie wir in Kapitel 4 sehen werden, ist der Weg, den der Kohlenstoff durch den Kreislauf von Photosynthese und Oxidation nimmt, alles andere als ein geschlossener Kreislauf. Ein Vielfaches des Kohlenstoffs, der von lebenden Materialien aufgenommen wird, wird ständig der Atmosphäre entzogen und als langlebiges oder dauerhaftes Karbonat Gestein aus dem Kreislauf genommen. Die Oberflächenbiosphäre muss also durch eine kontinuierliche und große Zufuhr von Kohlenstoff in Form von Methan oder CO_2 am Leben gehalten worden sein (oder, wie einige Beobachtungen vermuten lassen, durch eine Mischung aus beidem). CO_2 wird in beiden Fällen die letzte Zugabe zur Atmosphäre sein.

In der Biosphäre an der Oberfläche stammt die gesamte Energie, die biochemische Umwandlungen antreibt, letztlich vom Sonnenlicht. Das Leben in der tiefen heißen Biosphäre hat keinen Zugang zum Sonnenlicht, so dass die Energiequelle nicht auf die gleiche Weise funktionieren könnte. Aber auch dort ist Kohlenstoff der Grundbaustein des Lebens. Woher kommt dieser Kohlenstoff im unterirdischen Bereich?

Die aus der Oberflächenbiologie abgeleitete Vorstellung, dass CO_2 die Standard- Kohlenstoffversorgung für alles Leben ist, wurde von einigen Forschern auch auf das Leben in der Tiefe angewandt. Das Ozeanwasser enthält zwar reichlich CO_2, hat aber keine Energiequelle, um dieses zu reduzieren. Der reduzierte Kohlenstoff, der aus den Oberflächenschichten heruntertröpfelt, wäre völlig unzureichend. Aus einem Prozess, der mit oxidiertem Kohlenstoff beginnt und endet, kann keine Energie gewonnen werden. Wenn zu Beginn nicht oxidierter Kohlenstoff in Form von aufwärts wandernden Kohlenwasserstoffmolekülen zur Verfügung stünde, dann wären diese Moleküle der logische Kandidat für eine Kohlenstoffzufuhr, die ebenfalls eine energieerzeugende Sequenz ergeben würde, an deren Ende CO_2 steht.

Die heißen Ozeanschlote sind selbst keine Provinzen der tiefen Hotbiosphäre; sie sind Grenzgebiete zwischen zwei Welten, zwischen Oberfläche und Untergrund. Dennoch werden ihre Nahrungsketten von Prozessen angetrieben, die sich so sehr von denen der Oberflächenwelt unterscheiden, dass sie ein guter Ort sind, um mit der Erforschung der Energie der tiefen Heißbiosphäre zu beginnen. Die Mengen an Kohlenstoff, die vom Leben an der Meeresoberfläche nach unten sinken, sind völlig unzureichend, um die außergewöhnlich fruchtbare Biologie der Meeresschlotten zu versorgen. Das vulkanische Gestein des Meeresbodens enthält nur einen sehr geringen Anteil an Kohlenstoff - etwa 200 Teile pro Million (ppm). Die Gewinnung von Kohlenstoff aus dieser Quelle wäre schwierig und sehr energieaufwändig. Es gibt jedoch eine viel größere Kohlenstoffquelle in all diesen Gemeinschaften: Kohlenwasserstoffe. Methan (CH_4) ist im Allgemeinen am häufigsten vorhanden, aber die schwereren Mitglieder der Reihe wie Ethan (C_2H_6) und bis hin zu Ölen, die aus zwanzig bis dreißig Kohlenstoffatomen bestehen, sind ebenfalls entlang derselben Verwerfungslinien zu finden, wenn auch in Regionen, in denen weniger vulkanische Hitze zu spüren ist. Wie die nächsten beiden Kapitel zeigen werden, zeigen

diese Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten viele Merkmale, die darauf hindeuten, dass sie aus viel tieferen Regionen aufgestiegen sind.

Die chemische Energieversorgung, so könnte man dann vermuten, wird durch die Oxidation dieser Kohlenwasserstoffe angetrieben. Wenn man von Kohlenwasserstoffen ausgeht, umgeht man den ersten und energetisch anspruchsvollsten Schritt im Energiekreislauf der Oberfläche. Die chemische Energie, die an den Ozeanschloten zur Verfügung gestellt wird, ist derjenigen sehr ähnlich, die durch die Verbrennung von Erdgas (das größtenteils aus Methan besteht) und dessen Umwandlung in Wasser und Kohlendioxid zur Verfügung gestellt wird. Allerdings gibt es einen Haken. Wenn Methan in einem Ofen verbrannt wird, steht immer eine unbegrenzte Menge an Sauerstoff aus der Atmosphäre zur Verfügung. In den Schloten des Ozeans, einem Grenzgebiet zwischen der Oberflächen- und der Tiefenbiosphäre, könnte etwas atmosphärischer Sauerstoff vorhanden sein, der in Lösung im kalten Ozeanwasser nach unten getragen wurde. Wenn dies ausreichen würde, um das gesamte von den Schloten gelieferte Methan in Kohlendioxid und Wasser umzuwandeln, dann wäre diese Grenzlandprovinz von biologischen Prozessen an der Oberfläche abhängig und nicht ein Vorposten dessen, was ich als unabhängiges Reich des Lebens annehme, das sich bis in die Felsen darunter erstreckt. Es scheint zweifelhaft, dass das produktive Leben an diesen konzentrierten Orten auf dem Meeresboden genügend Luftsauerstoff aus dem Wasser erhalten könnte, aber eine eindeutige Antwort ist noch nicht bekannt. Diese Frage ist jedoch nicht von zentraler Bedeutung. Wir kennen inzwischen viele Fälle, in denen wir so weit in die tiefe Biosphäre vordringen können, dass der Luftsauerstoff überhaupt keinen Zugang hat, und wir beobachten dort ganz ähnliche Stoffwechselprozesse. Woher kommt der notwendige Sauerstoff?

Wie bereits erwähnt, ist reichlich Sauerstoff in den Gesteinen gebunden, aber das meiste davon ist so stark gebunden, dass mehr Energie erforderlich wäre, um es zu entfernen, als durch die anschließende Verwendung des Sauerstoffs für den Stoffwechsel gewonnen werden könnte. Es gibt nur zwei gebräuchliche Substanzen, in denen Sauerstoffatome so locker gebunden sind, dass mehr Energie aus der Verwendung des so gewonnenen Sauerstoffs gewonnen werden würde, als für seine Gewinnung aufgewendet wird. Diese beiden häufigen Substanzen sind hoch oxidiertes Eisen (Fe_2O_3 und verwandte Verbindungen) und oxidierter Schwefel (wie SO_2 und H_2SO_4 in Verbindungen, die als Sulfate bezeichnet werden). Wenn Mikroben an oder unter den Meeresschloten ihren Sauerstoffbedarf aus Eisenoxiden sichern, bleibt eine weniger oxidierte Form von Eisen übrig - Magnetit oder Greigit. Die mikrobielle Tätigkeit hinterlässt einen deutlichen Fingerabdruck: Die Kristalle dieser Produkte sind viel kleiner als die der gleichen Substanzen, die bei der Abkühlung von Gesteinen von flüssiger zu fester Form ausgefroren sind.

Das Wasser der Ozeane enthält die zweite Quelle für leicht gebundenen Sauerstoff, Sulfat, in großen Mengen. Sulfat (SO_4) ist das zweithäufigste Ion mit negativer Ladung im Meerwasser. Die Menge an Sauerstoff, die aus marinen Sulfat-Ionen gewonnen werden könnte, könnte den konvektiven atmosphärischen Sauerstoff, der an den Ozeanschloten verfügbar ist, deutlich übersteigen. Wenn Sauerstoff in der Nähe der Schlote tatsächlich hauptsächlich in Form von Sulfat vorhanden ist, dann sind die Mikroben, die die Kohlenwasserstoffe verwerten, in einer idealen Situation: Die chemischen Umwandlungen zur Gewinnung der chemischen Energie aus den aufsteigenden Kohlenwasserstoffen laufen nicht von alleine, da für den ersten Schritt der Freisetzung von Sauerstoffatomen aus dem Sulfat eine Energiezufuhr erforderlich ist. Für diesen energieaufwendigen Schritt werden die Mikroben aber im zweiten Schritt reichlich entschädigt.

Die Aufgabe, solche Transaktionen zu vermitteln, wird der Welt der Mikroben überlassen. Dabei ist es wichtig zu bedenken, dass ein chemischer Brennstoff für das Leben nutzlos ist, wenn er spontan verbrennt. Das Abendessen würde Ihnen nichts nützen, wenn das Essen auf Ihrem Teller in Flammen aufgeht. Damit eine Substanz als "Nahrung" gelten kann, darf sie nur mit Hilfe eines Katalysators oxidiert werden, der vom Leben geschaffen und
Leben eingesetzt wird. Dies ist eine Grundvoraussetzung sowohl für die Organismen an der Basis der Nahrungsketten der Oberflächen- und Tiefenbiosphäre als auch für alle Organismen, die später in der Reihe stehen.

Bei der Entfernung von Sauerstoff aus Sulfaten an den Ozeanschloten würde entweder reiner (elementarer) Schwefel oder Sulfide, also nicht oxidierte Schwefelverbindungen, entstehen. Die großen Mengen an Metallsulfiden, die an den Rändern von Ozeanschloten aufgehäuft gefunden werden, lassen vermuten, dass solche biologisch unterstützten Umwandlungen tatsächlich stattfinden.

Eine weitere Voraussetzung für den Aufbau von Organismen - seien es Bewohner der Oberflächenbiosphäre oder der unterirdischen Biosphäre - ist die Versorgung mit verschiedenen Metallen, die in den als Enzymen bezeichneten Eiweißmolekülen benötigt werden, die chemische Reaktionen katalysieren. Ebenfalls erforderlich für den biologischen Aufbau oder die chemische Verarbeitung sind einige reaktive Moleküle, die Elemente wie Schwefel, Phosphor und Chlor enthalten. Die benötigten Mengen dieser Elemente sind so gering, dass die obere Erdkruste sie normalerweise liefern kann. Die tiefe Biosphäre und die Landteile der Oberflächenbiosphäre sind damit ausreichend ernährt. Aber die Oberflächengewässer der offenen Ozeane können verarmt sein, insbesondere in Bezug auf Phosphor und Eisen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es wichtige Unterschiede und wichtige Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Biosphären gibt. Die Oberflächenbiosphäre läuft mit Sonnenenergie, die in chemische Energie umgewandelt wird; die Tiefenbiosphäre beginnt mit chemischer Energie, die frei aus der Tiefe der Erde zugeführt wird. Beide Biosphären sind auf unoxidierten Kohlenstoff als Baustein des Lebens angewiesen, aber das Leben an der Oberfläche gewinnt ihn zunächst mit Hilfe des Sonnenlichts aus Kohlendioxid in der Atmosphäre, während das Leben in der Tiefe ihn aus denselben Stoffen gewinnt, die als Energiequelle dienen: Kohlenwasserstoffe. Sauerstoff ist in beiden Bereichen eine Voraussetzung, da die chemische Energie nur im Prozess der Oxidation bereitgestellt wird. Für Oberflächenlebewesen liegt Sauerstoff weitgehend in Form von reinem, molekularem Sauerstoff vor. Die Bewohner des Untergrundes müssen sich ihren Vorrat mühsam erarbeiten, indem sie Sauerstoffatome gewinnen, die in Eisenoxiden und Sulfaten lose gebunden sind.

Die Ökologie des Lebens im Umfeld der Tiefseevulkane

Als Oberflächenbewohner sind wir geneigt, ein Ökosystem, das auf chemischer Energie statt auf photosynthetischer Energie basiert, als eine seltsame, wenn auch wunderbare Anpassung des Lebens zu betrachten. Wir bewundern die Ökologie der Tiefsee-Schlote als eine geschickte Anpassung des Lebens an der Oberfläche an eine unwirtliche Umgebung. Die Beweise sprechen dagegen. Mikroben und sogar Tiere gedeihen an diesen Schloten; man nimmt an, dass die Wachstumsraten sogar die der produktivsten Oberflä-

chenbereiche übersteigen. Wenn die Theorie der tiefen heißen Biosphäre richtig ist, würden wir daraus schließen, dass die mikrobiellen Pioniere von unten eingedrungen sind. Viele Sichtweisen müssten infolgedessen geändert werden.

Die Lebensgemeinschaften an den Schloten der Tiefsee unterscheiden sich von anderen marinen Ökosystemen nicht so sehr durch ihre schillernde Makrofauna, sondern durch ihre unsichtbaren Mikroben - Bakterien und Archaeen an der Basis des Nahrungsnetzes. Zwei Jahrzehnte an Studien haben gezeigt, dass sich diese Mikroben von Molekülen ernähren, die aus den Schloten sprudeln: Wasserstoff (H_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Methan (CH_4), von denen jedes nur dann Energie liefern kann, wenn Sauerstoff vorhanden ist.[1] Kein bekanntes Tier kann sich direkt von einer dieser Chemikalien ernähren, aber Tiere können sich von Mikroben ernähren, die dies tun. Besonders bemerkenswert an den Gemeinschaften der Tiefsee-Schlotanlagen ist, dass viele der Makrofauna auf symbiotische Partnerschaften mit den Mikroben angewiesen zu sein scheinen.

Venus- und Miesmuscheln sind symbiotische Partnerschaften mit Mikroben eingegangen, die in ihren Kiemengeweben gebunden sind. Die Riesenröhrenwurmart jedoch hat die Partnerschaft in eine neue Dimension geführt. Seine inneren Gäste sind so geschickt darin, Nahrung für sich und ihren Wirt zu produzieren, dass die Koevolution das Verdauungssystem des Wurms verkümmern ließ und ihn seines Mundes beraubte. Völlig abhängig von der Überproduktion seiner Symbionten hat der Röhrenwurm ein großes und spezialisiertes Organ tief in seinem Körper entwickelt, in dem die Mikroben leben können. Der Wurm versorgt seine Mikroben mit den Materialien, die sie benötigen, indem er gefiederte rote Kiemen einsetzt, um nützliche Moleküle aus dem Meerwasser zu filtern. Dann stellt er sein eigenes Kreislaufsystem zur Verfügung, um das zu transportieren, was die Kiemen gesammelt haben.

Die größte Herausforderung für die Organismen an den Hydrothermalquellen besteht darin, dass sie aus dem Bereich des Schlots herausgeschwemmt werden und dadurch die chemischen Vorräte und den Temperaturbereich verlieren, den sie benötigen. Muscheln und Röhrenwürmer lösen das Problem, indem sie sich an Ort und Stelle verankern. Krebse und Krabben und Schnecken, die zwischen den festsitzenden Organismen leben, können natürlich nach Bedarf kriechen und sich verankern. Die Mikroben, die die erste Stufe in der Nahrungskette bilden, haben ebenfalls Wege gefunden, ihren Platz zu halten. Die am besten an die Hitze angepassten Arten können sehr nahe am (und sogar innerhalb des) Schlots leben. Überall dort, wo es für tierische Weidegänger wie Schnecken zu heiß ist, um einzudringen, klammern sich die Mikroben in gemeinsamen Schleimmatten an die Felsen. Diejenigen, die sich in der Wassersäule oberhalb der austretenden Flüssigkeiten aufhalten, besitzen ein peitschenartiges Geißelwerk, mit dem sie sich fortbewegen, indem sie Temperatur- oder chemische Reize wahrnehmen, um ihre Bewegungen in die richtige Richtung zu lenken und so innerhalb oder in der Nähe des Schlotstroms zu bleiben. Die dreistesten bakteriellen Unternehmer sind diejenigen, die sich im Gewebe der Muscheln und Röhrenwürmer selbst zu willkommenen Gästen gemacht haben. Dort sind sie sowohl vor umherstreifenden Weidegängern als auch vor fehlgeleiteten Strömungen geschützt.

Die Brennstoffe Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Methan, die sowohl von freilebenden als auch von symbiotischen Mikroben in den Schlotgemeinschaften verbraucht werden, werden von Mikroben genutzt, die auf Sauerstoffatome zugreifen, die lose in Eisenoxid gebunden sind, das in den Schlotflüssigkeiten aus der Tiefe heraufgetragen

wird, auf Sauerstoff, der aus Sulfat stammt, das das Meerwasser durchdringt, und vielleicht auch auf freien Sauerstoff im Meerwasser.

Alle Tiere sind jedoch für ihren Stoffwechsel auf molekularen Sauerstoff angewiesen. Es sind keine Tiere bekannt, die Sauerstoff direkt aus oxidierten Materialien in ihrer Umgebung extrahieren. Viele Forscher haben daher angenommen, dass die Makrofauna an den Schloten auf den im Meerwasser mitgeführten molekularen Sauerstoff angewiesen ist. Damit wären diese Arten immer noch - indirekt - von der Photosynthese an der Oberfläche abhängig. Sie wären immer noch Mitglieder in unserem Nahrungsclub.

Der große Reichtum an molekularem Sauerstoff in der Atmosphäre ist hauptsächlich auf seine Produktion als Abfallprodukt der Photosynthese zurückzuführen - durch Pflanzen an Land und Algen und Cyanobakterien nahe der Meeresoberfläche. Molekularer Sauerstoff diffundiert in die Oberflächengewässer, besonders in hohen Breiten, da die Löslichkeit von Sauerstoff im Meerwasser bei niedrigen Temperaturen stark erhöht ist. Sauerstoffreiches Wasser aus der Arktis und Antarktis stürzt in die Tiefe und schlängelt sich dann langsam entlang des Meeresbodens, Tälern folgend, in Richtung Äquator. Ein globales System aus atmosphärischer und ozeanischer Zirkulation bringt also molekularen Sauerstoff in einige tiefe Bereiche des Meeresbodens.

Die meisten der entdeckten Ozeanschlote befinden sich an vulkanischen Bergrücken und hohen Stellen des Meeresbodens, und solche Gebiete erhalten nicht die kalten, sauerstoffreichen Ströme der polaren Gewässer. Ob der dorthin diffundierte Sauerstoff, der nur durch langsam fließendes Wasser zur Verfügung gestellt wird, ausreichen würde, um das an den Schloten beobachtete extrem schnelle Wachstum zu fördern, ist zweifelhaft. Zwar kann die Makrofauna keinen Sauerstoff aus anderen Quellen gewinnen, mikrobielles Leben aber schon. Wenn die Versorgung mit Sauerstoff der limitierende Faktor für die Schlotgemeinschaft ist, dann müssen wir vermuten, dass der symbiotische Austausch so weit fortgeschritten ist, dass die symbiontischen Mikroben in den Tieren nicht nur für sich selbst, sondern auch für ihre tierischen Wirte Sauerstoffatome aus dem Meerwassersulfat abziehen. Zweifellos werden weitere Untersuchungen zeigen, woher die Makrofauna ihren Sauerstoff bezieht. Aber, wie wir im nächsten Abschnitt diskutieren werden, sind viele mikrobielle Gemeinschaften identifiziert worden, die mit Sicherheit keinen Zugang zu atmosphärischem Sauerstoff haben.

Das Leben gedeiht an den Ozeanschloten, weil es sich um Orte an der Grenze zwischen zwei Welten handelt. Aus den dort aufeinandertreffenden Chemikalien, die keine Gelegenheit hatten, miteinander ins Gleichgewicht zu kommen, kann eine Fülle von chemischer Energie gewonnen werden. Aufsteigende Flüssigkeiten aus der Unterwelt sind reich an "reduzierten" Molekülen, wie Wasserstoff und Methan. Schwefelwasserstoff ist ebenfalls vorhanden, aber wir wissen noch nicht, ob es sich dabei um ein primäres Fluid aus der Tiefe der Erde handelt oder um ein Produkt von Mikroben, da diese eine Kombination aus Wasserstoff und Sulfat für ihren Energiebedarf nutzen.

Von den drei Hauptquellen, die bei der Reaktion mit Sauerstoff Energie liefern (Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Methan), hat Schwefelwasserstoff das meiste Forschungsinteresse auf sich gezogen, weil er der Brennstoff zu sein scheint, auf den die mikrobiellen Symbionten der Riesenröhrenwürmer und Muscheln angewiesen sind. Aber die Kohlenstoffatome, die den Kern aller organischen Moleküle bilden, müssen anderswo gewonnen werden. Das Vorhandensein von Methan im Ausstoß der Ozeanschlote ist da-

her von besonderer Bedeutung; es kann sowohl die Quelle des benötigten Kohlenstoffs als auch die Quelle chemischer Energie sein.

Kohlenwasserstoffe haben eine strukturelle Ähnlichkeit mit den Nahrungsmitteln, die wir essen und die von Photosynthesen stammen. Der einzige materielle Unterschied zwischen einem Molekül Hexan (einer sechskohlenstoffhaltigen Form des Erdöls) und einem Molekül Glukose (einem sechskohlenstoffhaltigen Zucker, der in Lebensmitteln an der Oberfläche häufig vorkommt) besteht beispielsweise darin, dass Wasserstoffatome die Kohlenstoffkette im Hexan umgeben, während Wassermoleküle die Kohlenstoffkette im Zucker umgeben. Das Hexan C_6H_{14} ist ein *Kohlenwasserstoff*, während der Zucker $C_6H_{12}O_6$ ein *Kohlenhydrat* ist. Der terminologische Unterschied ist subtil, aber wichtig. Für uns Tiere ist das Kohlenhydrat Nahrung, der Kohlenwasserstoff Gift. Dennoch sollten die biologischen Eigenheiten unseres eigenen Stammes des komplexen Lebens unser Urteil über die Möglichkeiten - oder gar Vorlieben - der multitalentierten Mikroben nicht einschränken. Sie könnten durchaus einen Stoffwechsel haben, der eine Zufuhr von Erdöl erfordert.

Es ist bekannt, dass es in den hydrothermalen Schlotgemeinschaften Mikroben gibt, die Methan als Energiequelle in Gegenwart von Sauerstoff und auch als Kohlenstoffquelle nutzen. Solche *Methanotrophen* ("Methanfresser") wurden als Symbionten in der Makrofauna identifiziert - bisher nur in Muscheln -, sind aber vermutlich auch freilebend.[2] Sie können auch schwerere Kohlenwasserstoffe verzehren.

Sind die Methanotrophen der Tiefsee-Schlote Botschafter aus dieser anderen, tieferen und vielleicht eigenständigen Welt? Wir wissen, dass Muscheln und Würmer sich nicht tiefer wagen als die dünne Haut von Oberflächengestein und Sedimenten. Aber was ist mit den Bakterien und Archaeen? Wenn mikrobielle Schleime auf den Felsen in der Nähe und innerhalb der Schlote von Methan- und Sulfidgasen leben, die von unten aufsteigen, könnten sie dann nicht auch einen geeigneten Lebensraum in Rissen und Porenräumen tief unter der Krustenoberfläche finden?

Ökologien anderer Grenzgebiete

In den letzten drei Jahrzehnten wurden viele und unterschiedliche Grenzland-Ökosysteme entdeckt und ihre Geheimnisse erforscht. Das erste, das die wissenschaftliche Aufmerksamkeit auf sich zog, war eine Art, die lange Zeit von Touristenmassen genossen wurde: die mikrobiellen Gemeinschaften, die die Felsen in den heißen Becken des Yellowstone-Nationalparks bunt überziehen. Die ernsthafte Erforschung des Stoffwechsels der thermophilen (wärmeliebenden) Mikroben des Yellowstone begann Mitte der 1960er Jahre.[3] Hier lernten die Wissenschaftler erstmals die außergewöhnlichen Talente der scheinbar einfachsten Lebensformen der Erde zu schätzen. Zum Beispiel lieferte ein Bakterium, das in den heißen Tümpeln des Yellowstone entdeckt wurde, *Thermus aquaticus*, das Enzym, das die Molekularbiologie begründete, indem es die DNA Replikation schnell und einfach machte. Heute bieten die heißen Quellen des Yellowstone eine reiche Fundgrube für Wissenschaftler, die der Liste der Mikroben, die in der taxonomischen Domäne der Archaea klassifiziert sind, neue Namen hinzufügen wollen.

1977 wurden die aufregenden Exotica, die wir bereits besprochen haben, unter dem Meer entdeckt - kunstvolle Assemblagen von Mikroben und Tieren an den Rändern heißer Quellen auf dem Meeresboden. Im Jahr 1984 wurden weitere Ansammlungen von sym-

biotischen Mikroben, Röhrenwürmern und Muscheln entdeckt - diesmal nicht in den a-byssalen Tiefen, sondern auf den viel flacheren Kontinentalsockel.[4] Ähnlich in der Form, aber taxonomisch unterschiedlich auf Art- oder sogar Gattungsebene, lebten die Röhrenwürmer und Muscheln auf den Kontinentalschelfen in " Kalten Senke "-Regionen, wo Rohöl und Kohlenwasserstoffflüchtlinge durch die Sedimente nach oben sickern. Im Gegensatz zu den hydrothermalen Quellen, die punktuelle Quellen mit begrenzter Größe sind, bieten kalte Erdölquellen dem Meeresleben chemische Energie über einen längeren Zeitraum.

Im Gegensatz zu den hydrothermalen Quellen, die punktuelle Quellen mit begrenzter Größe sind, bieten kalte Erdölquellen dem Meeresleben chemische Energie über weite Bereiche der Kontinentalschelfe, die zu tief sind, um Photosynthese zu unterstützen. (Selbst in den klarsten Gewässern ist Photosynthese in einer Tiefe von mehr als 200 Metern unter der Meeresoberfläche unmöglich, und die Kontinentalschelfe sinken oft in eine Tiefe von einem Kilometer oder mehr). Die Wachstumsraten in den Regionen der Kohlenwasserstoff-Austritte sind jedoch nicht so hoch wie an den aktiv austretenden Riffzonen der Tiefsee.

Auch an Land hat ein Grenzbereich des Ökosystems die Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Öffentlichkeit auf sich gezogen. Im Jahr 1986 wurde eine Höhle in Rumänien - bis dahin von der Atmosphäre isoliert - entdeckt und es wurde festgestellt, dass sie ein blühendes Ökosystem enthält, das auf der chemischen Energie der reduzierten Gase basiert, die von unten aufsteigen. Zehn Jahre später, als die biologische Bestandsaufnahme veröffentlicht wurde, wurde dieser Höhlenlebensraum von den Medien als erstes Beispiel für eine terrestrische Ökologie angepriesen, die nicht auf Photosynthese basiert und dennoch in der Lage ist, nicht nur Mikroben, sondern auch Landtiere zu ernähren.[5] Von der bakteriellen Basis des Nahrungsnetzes ernähren sich mehr als vierzig Arten von wirbellosen Tieren, die in Höhlen leben, darunter Spinnen, Tausendfüßler, Hundertfüßler, Wanzen, Springschwänze, Skorpione und Blutegel. Dreiunddreißig davon sind neu für die Wissenschaft. Wie in den Tiefsee-Schlots wurde auch in dieser Höhle Schwefelwasserstoff als das reduzierte Gas identifiziert, das die Basis der Nahrungskette stützt, obwohl ich vermute, dass auch Methan eine Rolle spielt. Es ist durchaus möglich, dass die Methankonsumenten Schwefelwasserstoff als Abfallprodukt erzeugen, wenn Sulfat zur Oxidation von Methan verwendet wird; in diesem Fall wären die Sulfidkonsumenten eine Stufe höher als die Basis der Nahrungskette. Schwefelwasserstoff, durch Wasser in Schwefelsäure umgewandelt, hat wahrscheinlich die Kalksteinhöhle ausgehöhlt.

1997 wurde in Südmexiko ein weiteres Höhlenökosystem erforscht, das ausschließlich auf chemischer Energie basiert. Auch diese Höhle scheint durch einen Strom von Schwefelsäure aus dem Kalkstein herausgearbeitet worden zu sein. Die Säuredämpfe in dieser Höhle sind so intensiv, dass die Wissenschaftler in der Lage waren nur mit Hilfe von Atemmasken eine Meile in die Tunnel vordringen konnten. Das mikrobielle Leben in der Höhle ist so zahlreich, dass die Wände mit Schleim bedeckt sind.[6] Von den Mikroben ernährt sich eine Gemeinschaft von Wirbellosen, aber dieses Ökosystem unterstützt auch Wirbeltiere: winzige Fische in dem hüfttiefen Wasser, das das Tunnelsystem bewohnt.

Erst kürzlich bereiteten sich russische Wissenschaftler darauf vor, einen riesigen See - so groß wie der Ontariosee - zu erforschen, der in der Zentralantarktis unter einer vier Kilometer dicken Eisschicht entdeckt wurde.[7] Der Wostoksee verdankt seine Existenz dem Einschluss der überall im Erdinneren aufsteigenden Wärme. Das dicke Gletschereis wirkt

merkwürdigerweise wie ein thermischer Isolator, der die Wärme von der intensiven Kälte der antarktischen Luft trennt.

Fernsensoren zeigen eine Wassertiefe von vielleicht 600 Metern an einigen Stellen an, die von 100 Meter dicken Sedimenten unterlagert ist. Die Bohrungen wurden 250 Meter oberhalb der Wasserlinie gestoppt, bis Verfahren implementiert wurden, die einen sterilen Kontakt gewährleisten können. Wenn es dort unten Leben gibt, wird es zweifellos auf chemischer Energie beruhen, die von unten nach oben strömt. Um diese Möglichkeit zu testen, muss unbedingt verhindert werden, dass der unberührte See durch Oberflächen-mikroben verunreinigt wird. Die NASA hat ihr Interesse bekundet, Technologien zur sterilen Erforschung des Wostoksees zu fördern, was wahrscheinlich nicht vor 2001 geschehen würde. Ein Grund für das Interesse der NASA ist, dass ein subglazialer See ein außergewöhnliches Analogon für die unterirdische Umgebung von Europa bietet, einem Mond des Jupiters, der mit einer dicken Eisschicht bedeckt ist und darunter möglicherweise flüssiges Wasser hat.[8]

Eine wichtige Entdeckung von sehr großen Mengen an Methan wurde in den letzten zwei Jahrzehnten gemacht. Methanhydrate, Kristalle aus Wassereis, die Methanmoleküle in ihren Gittern einschließen, existieren in großen Mengen auf vielen Gebieten des Meeresbodens. Das Vorhandensein von Methan hebt den Gefrierpunkt von Wasser um einen Betrag an, der vom Umgebungsdruck abhängt, und daher kann sich dieses Eis in Regionen bilden wo Wasser in flüssiger Form zugeführt wird und dann dort gefriert, wo Methan hinzugefügt wird.

Damit sich Methanhydrate bilden können, dürfen die Temperaturen nicht höher als etwa 7°C und die Drücke nicht niedriger als etwa 50 Atmosphären sein. Das bedeutet, dass ein Großteil des Meeresbodens, der sich außerhalb der vulkanischen Zonen befindet und bis zu einer Tiefe von 500 Metern oder mehr mit Wasser bedeckt ist, Methanhydrate beherbergen könnte.[9] In den letzten zwei Jahrzehnten haben wir sowohl durch Fernerkundung als auch durch direkte Probennahme gelernt, dass Methanhydrate tatsächlich in großen Mengen in vielen Bereichen des Meeresbodens existieren. Sie erzeugen eine klare und eindeutige Signatur auf dem Sonar und werden per Fernerkundung als deutliche Schicht im Meeresschlamm wahrgenommen, die manchmal direkt auf dem Grundgestein des Meeresbodens liegt. Ein großer Bereich des Kontinentalschelfs wurde auf diese Weise vermessen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Methanhydrate tatsächlich überall dort vorkommen können, wo Druck und Temperatur ihre Bildung zulassen.[10] Man schätzt, dass Methanhydrate (sowohl die in der arktischen Permafrostschicht als auch die unter dem Meer) mehr nicht oxidierten Kohlenstoff enthalten als alle anderen bekannten Vorkommen von nicht oxidiertem Kohlenstoff in der Erdkruste, wie Erdöl, Erdgas und Kohle.[11]

Oft ist in den Methanatomen, die in einer Hydratlagerstätte eingeschlossen sind, mehr Kohlenstoff enthalten als in allen Sedimenten, die mit dieser Lagerstätte verbunden sind. In solchen Fällen kann die konventionelle Erklärung der Quelle (biologische Materialien, die mit den Sedimenten begraben sind) die Produktion von so viel Methan nicht erklären. Das in den Eisgittern eingebettete Methan muss von unten durch unzählige Risse im Grundgestein aufgestiegen sein. Sobald sich eine dünne, deckende Schicht des Festkörpers gebildet hat, ist die Entstehung weiterer solcher Hydrate darunter unvermeidlich, vorausgesetzt, das Methan steigt weiter auf.

Diese Schlussfolgerung - dass die Quelle des Methans unter und nicht in den Krustensedimenten liegt - wird durch den Nachweis von Taschen mit freiem Methangas unter einigen Regionen mit Hydrat Eises[12] und auch unter den Permafrostschichten der arktischen Tundra.[13] In diesen Regionen scheint eine Abwärtswanderung von Methangas aus den darüber liegenden Sedimenten nicht denkbar. Gase wandern schließlich nicht in einer Flüssigkeit mit größerer Dichte nach unten. Wenn es eine Strömung gibt, dann in umgekehrter Richtung.

Der Wostok-See, den wir gerade besprochen haben, ist ein idealer Ort, um die Menge an Kohlenwasserstoffen zu überprüfen, die seit der Bildung der Eisdecke von unten nach oben gelangt sind. Die dort enthaltenen Mengen an Methanhydraten können sehr groß sein, sie können sogar den Hauptbestandteil des Sees darstellen.

Im Bereich der hohen Methanhydrate gibt es auch Makrolebewesen, genau wie an den Meeresschloten. Man findet dort kleine Würmer, die die Methanhydrate und das darüber liegende Wasser durchpflügen.[14] Ihre Existenz deutet darauf hin, dass solche Methanhydrate schon lange genug existieren, damit sich das Leben an die seltsamen Umstände anpassen konnte. Wahrscheinlich nutzen symbiotische Mikroben im Inneren der Würmer Energie, die aus der Oxidation von Methan gewonnen wird. Die Kohlenhydrate und andere biologische Moleküle, die die Mikroben produzieren, werden dann mit ihren tierischen Wirten geteilt. Hydrate, die nicht aus Methan, sondern aus CO_2 bestehen, können ebenfalls existieren, allerdings über einen kleineren Stabilitätsbereich von Temperatur und Druck als Methanhydrate. Nichtsdestotrotz gibt es beträchtliche Bereiche des Meeresbodens, die CO_2- Hydrate tragen könnten, aber nur wenige - wenn überhaupt - solche Proben wurden gefunden. Die Schlussfolgerung muss sein, dass die "sanfte", aber weit verbreitete Zugabe von Kohlenstoff in die Atmosphäre ein globales Phänomen der Diffusion von Methan und anderen Kohlenwasserstoffen aus dem Boden ist, zweifellos mit unterschiedlichen Raten an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten. Die Dominanz von CO_2 gegenüber Methan aus Vulkanen ist die Ausnahme und nicht die Regel. Diese Schlussfolgerung stimmt dann auch mit der Feststellung überein, dass Methan in Bohrlöchern weitaus häufiger vorkommt als CO_2 (zum Glück für die Erdölindustrie), und auch mit dem Nachweis aus Meteoriten dass Kohlenwasserstoffe und nicht CO_2-produzierende Verbindungen der Haupteintrag von Kohlenstoff in die sich bildende Erde gewesen sein werden. (In den Kapiteln 3 und 4 werden diese Punkte im Detail untersucht).

Tiefe ist wünschenswert

In Anbetracht der Entdeckungen blühender Ökosysteme auf chemischer Basis in Verbindung mit Methanhydraten, heißen Ozeanschloten und kalten Erdölquellen auf dem Ozeanboden sowie in Verbindung mit heißen Quellen und gasreichen Höhlen an Land können wir schlussfolgern, dass Methan, Schwefelwasserstoff und andere energiereiche Gase (die in Verbindung mit Sauerstoffvorräten große Mengen an Energie liefern könnten) für Lebensformen attraktiv sind, die einen großen Temperaturbereich abdecken. In unmittelbarer Nähe der Heißen Ozeanschlote und überall dort, wo heiße Quellen an Land mehr als nur warm sind - etwa über 45 °C -, sind diese Lebensräume für Tiere jedoch nicht geeignet. Aber wärmeliebende (thermophile) Mikroben sind an diesen Orten reichlich vorhanden.

Wenn die Temperaturen noch weiter ansteigen, scheiden die Thermophilen aus, aber die Hyperthermophilen - Mikroben, die am besten bei 80 °C oder mehr wachsen[15] - gehen unbehelligt ihrer Arbeit nach. Die wachsartigen Zellmembranen, die für Hyperthermophi-

le charakteristisch sind, erleichtern den Stoffaustausch bei Temperaturen, bei denen fetthaltige Membranen wie die unsere einfach schmelzen würden.[16] Hyperthermophile können nur bei solch hohen Temperaturen wachsen und sich vermehren. Bei niedrigeren Temperaturen versteifen sich ihre Membranen so weit, dass Stoffe nicht mehr wie nötig durchdringen können. Moleküle, so genannte Hitzeschockproteine, umhüllen die DNA und reguläre Proteine von Hyperthermophilen und schützen die kompliziert gefalteten Strukturen vor dem Aufbrechen, das eine so hohe Hitze sonst bewirken würde.

Welches sind die höchsten Temperaturen, die Hyperthermophile tolerieren können? Wir sind noch unsicher. Aber wir wissen, dass die Temperatur allein ebenso wenig über die Lebensfähigkeit einer Umgebung entscheidet, wie sie den Siedepunkt einer Flüssigkeit bestimmt. Eine
als sie für den Siedepunkt einer Flüssigkeit entscheidend ist. Ein weiterer Faktor muss berücksichtigt werden: der Druck.

Obwohl der Siedepunkt von Wasser auf Meereshöhe 100°C beträgt, steigt er in einer Tiefe von nur 876 Metern auf volle 300°C an. In dieser Tiefe übt die Wassersäule einen Druck von 87 Atmosphären aus, also 87-mal mehr als der Druck der Atmosphäre an der Meeresoberfläche. Dieser Druck reicht aus, um zu verhindern, dass sich Wassermoleküle selbst bei 299°C in eine Dampfphase ausdehnen. Noch tiefer, in einer Tiefe von 2,25 Kilometern, wird der "kritische Punkt" erreicht. Hier ist der Druck so groß, dass es unabhängig von der Temperatur keine Unterscheidung mehr zwischen Dampf und Flüssigkeit gibt. Vielmehr ist es angebracht, das Wasser jenseits des kritischen Punktes als Flüssigkeit zu bezeichnen, und zwar als "superkritische" Flüssigkeit.

Man bedenke nun, dass die erste Gemeinschaft von Hydrothermalschlot-Organismen, die jemals im abyssalen Bereich des Meeres beobachtet wurde, in einer Tiefe von 2,6 Kilometern gefunden wurde. Hier ist das Wasser ein überkritisches Fluid. Es wurde Wasser mit einer Temperatur von etwa 300°C nachgewiesen, das aus den Schloten austritt, aber durch die Vermischung mit dem umgebenden Wasser schnell abgekühlt wird. Sieden ist für Organismen in dieser Tiefe kein Thema, da Wasser dort nicht sieden kann. Das Schmelzen von Membranen und das Auflösen von Proteinen könnten vielmehr die begrenzenden Faktoren für das Leben bei hohen Temperaturen werden.[17]

Wenn man mit Temperaturen nahe oder über 100°C zurechtkommen muss, dann ist die Tiefe wegen der Druckwirkung sicher wünschenswert. Wie verbreitet sind Zonen mit solch hohen Temperaturen? Heiße Quellen - ob auf dem Meeresboden oder an Land - sind alles andere als die Norm. Sie treten dort auf, wo die tief im Inneren des Planeten erzeugte Wärme einen schnellen Fluchtweg an die Oberfläche findet, und zwar durch Flüssigkeiten, die von unten nach oben getrieben werden. Dies sind aktive vulkanische Zonen. Viel häufiger sind nicht- vulkanische Regionen, wie die, über denen Sie und ich wahrscheinlich gerade sitzen.

Die Erde erzeugt ihre eigene Wärme durch Kompression, Schwerkraft und radioaktiven Zerfall tief in ihrem Kern und Mantel. In einer nicht vulkanischen Region nimmt die Temperatur des Gesteins, beginnend an der Oberfläche, mit der Tiefe stetig zu, und zwar mit einer über den gesamten Globus ziemlich gleichmäßigen Rate. Dieses Phänomen wird als thermischer Gradient der Erde bezeichnet. Die Temperatur der Kruste in der Nähe des Kontakts mit der Atmosphäre beträgt über den größten Teil der Fläche etwa 20°C. In

nicht-vulkanischen Regionen steigt die Temperatur mit einer Rate von 15°C bis 30°C pro Kilometer Tiefe an.

Es sind Hyperthermophile bekannt, die bei Temperaturen von 110°C wachsen können. Das bedeutet, dass das Leben, wie wir es kennen, im Durchschnitt bis in eine Tiefe von sechs Kilometern in Krustenregionen mit niedrigem Temperaturgradienten (15°C pro Kilometer oder weniger) und drei Kilometern mit hohem Temperaturgradienten (30°C pro Kilometer) überleben könnte, vorausgesetzt, die notwendigen chemischen Ressourcen sind vorhanden. Es ist noch nicht klar, ob es Hyperthermophile gibt, die noch höhere Temperaturen tolerieren können.

Einige Mikrobiologen sind der Meinung, dass die Temperaturgrenze für mikrobielles Leben bei 150°C liegen könnte.[18] In diesem Fall könnte sich das Leben bis in tiefere Schichten ausbreiten, in einigen kühlen Gebieten möglicherweise bis in eine Tiefe von zehn Kilometern. Es ist wichtig, sich daran zu erinnern, dass aufgrund des mit der Tiefe stetig ansteigenden Drucks nirgendwo in der Erdkruste (mit Ausnahme der vulkanischen Zonen) die Kombination aus Temperatur und Druck jemals ein Sieden des Wassers zulässt. Was ist mit Methan, dem leichtesten und daher am schnellsten siedenden aller Kohlenwasserstoffe? Wenn man sich entlang eines thermischen Gradienten nach unten bewegt, wird Methan bei den größeren Drücken in zunehmender Tiefe immer dichter, auch wenn es ein Dampf bleibt. Was bedeutet dieser Anstieg der Dichte für unterirdische Lebensformen, die sich von Methan ernähren?
Zum einen bedeutet die höhere Dichte, dass das Methan in der Tiefe für das Leben leichter zugänglich ist. In sechs Kilometern Tiefe wäre Methan zum Beispiel 400-mal so dicht wie an der Oberfläche bei Atmosphärendruck.

Oberfläche bei Atmosphärendruck. Außerdem erhöhen die höheren Temperaturen, die mit größeren Tiefen einhergehen, die Geschwindigkeit, mit der Methanmoleküle mit den Zellmembranen der Mikroben zusammenstoßen. Beide Faktoren erhöhen die Geschwindigkeit, mit der Methan durch die Zellmembranen diffundieren würde. Eine große Tiefe ist also nicht nur wünschenswert, um einige der biologischen Probleme zu lindern, die durch hohe Temperaturen entstehen, sondern auch, um den Methankonsumenten den Zugang zu ihrer Nahrung zu erleichtern.

Hier oben in der Oberflächenbiosphäre, wo Methan nur als diffuses Gas existiert, sind Methankonsumenten eine merkwürdige Gruppe. Aber die Methanotrophen sind vielleicht alles andere als tangentiale Mitglieder des Nahrungsnetzes in der tiefen Biosphäre. Sie könnten sogar die Grundlage dieses Systems sein.

Unterhalb der Grenzgebiete

Um die tiefe heiße Biosphäre zu erforschen und ihre Bewohner zu beproben, müssen wir weit unter die Grenzregionen von heißen Quellen, hydrothermalen Schloten, Ölquellen, Methanhydraten und gasreichen Höhlen vordringen. Wir müssen auf den Grund tiefer Brunnen blicken, die in die Erdkruste gebohrt wurden.

Als ich in den frühen 1980er Jahren begann, die Idee der tiefen, heißen Biosphäre zu entwickeln, und als mein Aufsatz "Deep, Hot Biosphere" 1992 veröffentlicht wurde,[19] war ein hartnäckiger Kritikpunkt, dass Mikroben, die in Proben aus den Tiefen von Öl- und Gasbohrungen auftauchten, keine einheimischen Bewohner waren, sondern Opportunis-

ten, die mit biologisch kontaminierten Bohrflüssigkeiten von der Oberfläche eingeschleppt wurden.[20] Dieses Kontaminationsargument war zunächst schwer zu widerlegen. Aber 1995 wurde in einer der wichtigsten wissenschaftlichen Fachzeitschriften eine Schlüsselarbeit veröffentlicht, die zeigte, dass die in Frankreich in 1,6 Kilometern Tiefe entdeckten Mikroben tatsächlich "Mitglieder einer tiefen, einheimischen, thermophilen Gemeinschaft" waren.[21] Im folgenden Jahr wurde in einem weiteren Bericht über einheimische Mikroben, diesmal aus einer Ölbohrung in Alaska, eine aktive Biologie in 4,2 Kilometern Tiefe und bei einer Temperatur von 110 °C nachgewiesen.[22] 1997 bestätigte die Entdeckung von mikrobiellen *Fossilien*, die in 200 Metern Tiefe in Granitgestein eingebettet waren, die einheimische Interpretation; Fossilien können nicht durch Bohrspülungen in festen Granit eingebracht werden.[23]

Der bisher tiefste Hinweis auf aktive Biologie wurde 1991 in einer Tiefe von 5,2 Kilometern in Schweden entdeckt, wie wir in Kapitel 6 sehen werden.[24] Bezeichnenderweise war das Bohrloch, in dem diese Mikroben entdeckt wurden, in festes Granitgestein gebohrt worden, nicht in die Sedimentschichten, die normalerweise Erdölsucher anziehen. Eine Probe, die Eine Probe, die in der Tiefe entnommen und versiegelt und dann hochgezogen wurde, wurde im Labor kultiviert. Sie ergab bisher unbekannte Stämme von anaeroben Mikroben, die sich nur in dem Temperaturbereich reproduzierten, aus dem sie entnommen worden waren, nämlich 60°C bis 70°C.

Der von mir geprägte Begriff "*tiefe heiße Biosphäre*" wird manchmal in wissenschaftlichen Abhandlungen oder in der Medienberichterstattung erwähnt, die solche Funde von in der Tiefe entdecktem mikrobiellem Leben interpretieren.[25] Viele dieser Berichte missverstehen jedoch meine Argumentation und interpretieren, wie ich glaube, die Fakten in einer Weise falsch, die alles andere als trivial ist. Diese Fehler sind von zweierlei Art.

Erstens werden Mikroben aus tiefen Ölbohrungen zu Recht so interpretiert, dass sie sich von Kohlenwasserstoffen ernähren. Dabei wird jedoch implizit angenommen, dass die Kohlenwasserstoffe die überarbeiteten Überreste von Lebewesen sind, die einst zur photosynthetischen Nahrungskeule gehörten - Algen und dergleichen.[26] Dies ist die westliche Standardansicht eines vermeintlich biogenen Ursprungs von Erdöl, die ich im nächsten Kapitel in Frage stellen werde. Solange Erdöl als biogen angesehen wird, wird es, egal wie weit unten in den Ölquellen Leben gefunden wird, immer als eine Neuheit angesehen werden - eine spannende Erweiterung der Oberflächenbiosphäre nach unten, während sie ihre eigenen früheren Überreste abbaut.

Ein zweiter Fehler in Berichten, die die Entdeckung einer tiefen Biosphäre oder sogar einer tiefen heißen Biosphäre ankündigen, ist die Charakterisierung der einheimischen Mikroben als "steinfressend". Dieser zweite Fehler erfordert etwas mehr Erklärung als der erste. Zunächst einmal ist "felsenfressend" die übliche Interpretation des mikrobiellen Stoffwechsels, wenn Mikroben in Bohrlöchern entdeckt werden, die in Eruptivgestein gebohrt wurden. Da Eruptivgestein aus einer Schmelze entstanden ist, müssen die einzigen Kohlenwasserstoffe, die es enthalten könnte, von irgendwoher eingewandert sein, nachdem das Magma zu Gestein abgekühlt war. Nach der üblichen Denkweise würden diese Kohlenwasserstoffe in die Risse und Poren des Eruptivgesteins aus einem nahegelegenen sedimentären "Quellgestein" (wie z.B.
Schwarzschiefer) sickern. Wenn es kein Quellgestein in der Nähe gibt, ist diese Erklärung unbrauchbar.

Berichte über mikrobielles Leben in Eruptivgestein sind wesentlich weniger verbreitet als Berichte über Mikroben, die in Sedimentgestein nachgewiesen wurden. Der Grund für ihre Seltenheit ist einfach: Wenn wir glauben, dass Öl und Gas die überarbeiteten Überreste von Leben an der Oberfläche sind, das lange Zeit in Sedimenten begraben war, die sich zu Gestein verfestigt haben, warum sollte dann irgendjemand in magmatischem Gebiet bohren? Die Anzahl der Bohrungen in Sedimentgestein ist so viel größer als die Anzahl der Bohrungen in Eruptivgestein, dass allein diese Diskrepanz schon den Unterschied in der Anzahl der Berichte über mikrobielles Leben aus den beiden Bereichen erklären kann.

Tiefbohrungen in nicht-sedimentäres Gestein wurden dennoch durchgeführt, entweder für Erkundungen allgemeiner Art oder für einen ganz anderen Zweck: zur Beurteilung der radioaktiven Kontamination des Grundwassers. Während des Kalten Krieges wurden die bei der Plutoniumproduktion anfallenden radioaktiven Abfälle nicht immer sorgfältig entsorgt. Dies war der Fall in der nuklearen Aufbereitungsanlage Hanford im Zentrum des Bundesstaates Washington, die auf Basalt des Columbia River errichtet wurde. Ein Testbrunnen, der 400 Meter tief in das Eruptivgestein gebohrt wurde, um die radioaktive Verseuchung des Grundwassers zu untersuchen, hatte den Nebeneffekt, dass man Bakterien entdeckte.[27] Auf was lebten sie? Weil alle glaubten, dass ein so ausgedehnter Basalt unmöglich Kohlenwasserstoffe enthalten könne, wurde das dort nachgewiesene reichliche Vorkommen von Methan[28] als Stoffwechselnebenprodukt einer späteren Stufe in der Nahrungskette (mit welcher Kohlenstoffquelle?) interpretiert - und nicht, wie ich meinen würde, als Brennstoffquelle für die Primärproduzenten.

In Eruptivgestein ist Methan bei weitem die häufigste Flüssigkeit, an zweiter Stelle nach Wasser. Methan ist die wahrscheinlichste Brennstoff-, Kohlenstoff- und Wasserstoffquelle an der Basis der Nahrungskette. Meiner Meinung nach ist Kohlendioxid größtenteils ein *Produkt* der mikrobiellen Oxidation von Kohlenwasserstoffen und nicht die *Kohlenstoffquelle* für die Basis der Nahrungskette. Diese Ansicht - dass Kohlenwasserstoffe sowohl die Kohlenstoffquelle als auch den Treibstoff für die Biosynthese in der Tiefe liefern - wurde durch eine 1994 veröffentlichte Arbeit gestärkt.[29] Petra Rueter und Kollegen kultivierten eine mäßig thermophile Mikrobe unter Bedingungen, die bestätigten, dass diese Stoffwechselstrategie verwendet wird, wobei Sulfat das Oxidationsmittel liefert.

Aus vielen Gründen stimme ich daher nicht mit den ökologischen Interpretationen der Forscher überein, die am Columbia-Basalt-Aquifer arbeiten. Dennoch kann ich gut verstehen, wie es zu Fehlinterpretationen kommen konnte. Es ist schwierig, Proben zu nehmen, zu kultivieren und das Vorhandensein von einheimischem Leben in der Tiefe zu identifizieren. Noch schwieriger ist es, die Grundlage des Nahrungsnetzes und die Brennstoff- und Materialquellen zu bestimmen, auf denen der primäre Stoffwechsel beruht. Solange der Primärstoffwechsel nicht identifiziert ist, kann man jedoch nicht sicher sein, ob ein bestimmter chemischer Bestandteil eine ursprüngliche Ressource oder ein biologisches Produkt ist.

Es sollte nun klar sein, dass der beste Weg, etwas über die tiefe heiße Biosphäre zu erfahren - und sogar zu testen, ob dieses vermutete Reich des Lebens tatsächlich existiert - darin besteht, in Gestein zu bohren und zu untersuchen, was sich dort unten befindet. Bisher wurden nur wenige oder gar keine Löcher mit dem ausdrücklichen Ziel gebohrt, nach tiefem Leben zu suchen. Bohrungen werden durchgeführt, um nach kommerziellen Mengen an Kohlenwasserstoffen zu suchen, um die Kontamination des Grundwassers zu testen oder um Daten zum Verständnis geologischer Prozesse zu erhalten. Jegliches mikro-

bielles Leben, das bei solchen Unternehmungen angetroffen wird, wird fast immer als biologische Kontamination von der Oberfläche abgetan, die mit den Bohrflüssigkeiten eingebracht wurde.

Die Lebensräume im Grenzbereich sind zwar spannend, aber sie können nicht mit Sicherheit zeigen, ob und welche biologischen Prozesse in der Tiefe aktiv sind. Bislang haben wir nur flüchtige Einblicke in das, was sich als weitreichender Ausdruck irdischen Lebens erweisen könnte, das auf unsere Erforschung wartet. Erfreulicherweise ist die Nachfrage nach Untersuchungen von Mikroben, die aus der Tiefe geholt werden, in letzter Zeit stark gestiegen. Das Interesse an einer tiefen heißen Biosphäre (wenn auch nicht unbedingt meine strenge Interpretation einer unabhängigen, kohlenwasserstoffbasierten tiefen Biosphäre) ist aufgeblüht. Ein Teil dieses Interesses wurde durch die Anzahl der Tiefbohrungen stimuliert, die positiv auf biologische Bewohner getestet wurden. Da dort unten kein Leben vermutet wird, ist unsere Neugierde geweckt. Ein anderer Teil des Interesses ist dem Erfolg des Evolutionsforschers Carl Woese von der University of Illinois zuzuschreiben, der die Biologen davon überzeugte, dass eine ganz neue Domäne des Lebens der Erforschung harrt - die Archaea.[30]

Bis vor kurzem wurden alle lebenden Organismen entweder als Prokaryoten (zu denen alles gehörte, was man damals Bakterien nannte) oder als Eukaryoten (zu denen Pflanzen, Tiere, Pilze, Schleimpilze und einzellige Protoktisten gehörten) klassifiziert. Mehrere wichtige zelluläre Merkmale unterschieden diese beiden Gruppen, wobei der Hauptunterschied darin bestand, dass Prokaryoten im Gegensatz zu Eukaryoten keinen Zellkern besaßen, der ihr genetisches Material enthielt.

In den 1960er und 1970er Jahren entdeckte Woese, dass sich eine Gruppe von Prokaryoten (die er Archaebakterien nannte) in ihren ribosomalen RNA-Sequenzen und in einigen wichtigen metabolischen und morphologischen Merkmalen stark von allen anderen unterschied. Als 1996 die vollständige genetische Sequenz einer dieser abweichenden Mikroben veröffentlicht wurde,[31] war den meisten Experten klar, dass die Klassifizierung der Prokaryoten überdacht werden musste: Die Archaebakterien enthielten viele einzigartige Gene, und die Gene der Archaebakterien schienen mehr mit denen der Eukaryoten gemeinsam zu haben als mit denen des restlichen Stammes der Prokaryoten. Als Ergebnis dieser Arbeit werden die Prokaryonten nun typischerweise als zwei "Domänen" betrachtet, von denen eine immer noch als Bacteria (oder Eubacteria) und die andere als Archaea bezeichnet wird. (Eukarya ist wie zuvor geblieben, wird aber jetzt als dritte Domäne in diesem taxonomischen System betrachtet.)

Woeses konzeptionelle Revolution macht deutlich, wie wichtig es ist, weitere Forschungen in der Domäne Archaea durchzuführen, über die so wenig bekannt ist. Außerdem zeigt die Drei-Domänen-Klassifikation des Lebens, dass Hyperthermophilie das älteste Merkmal ist.
Die von Woese vorgeschlagene Neuklassifizierung des mikrobiellen Lebens hat eine starke Resonanz mit dem Konzept einer tiefen heißen Biosphäre. Der separate Zweig des Lebens, den er Archaea genannt hat, muss einen frühen Ursprung in der Evolution des Lebens gehabt haben, wenn man nach den einfachen genetischen Systemen dieser Organismen urteilt, und weil so viele Stämme hyperthermophil sind, müssen sie bei einer hohen Temperatur entstanden sein. Es scheint sehr unwahrscheinlich, dass sich eine Form der thermophilen Archaea an einem heißen Ozeanschlot entwickelte und sich von dort aus an viele andere Orte verbreitete und sich zu der großen Vielfalt an Stämmen entwickelte,

die wir heute beobachten. Es scheint wahrscheinlicher, dass sie eine globale Evolution einer frühen Lebensform darstellen, die von der Versorgung mit chemischer Energie durch die Erde abhängig war. Archaeen wären also das Produkt einer langen Evolution in einem großen, zusammenhängenden und langlebigen Lebensraum. Sie könnten die frühesten Bewohner - und auch heute noch die Hauptbewohner - der tiefen, heißen Biosphäre sein, die die Erde umgibt.

Um den Ursprung des irdischen Lebens zu ergründen, müssen wir uns mit den Organismen beschäftigen, die in extremer Hitze gedeihen. Nur die Domänen der Bakterien und Archaeen enthalten Hyperthermophile, und nur bei den Archaeen dominiert diese Eigenschaft. Wo können wir nach Hyperthermophilen suchen? Wir können natürlich die Grenzgebiete der heißen Quellen und der Schlote in der Tiefsee untersuchen, aber die weitaus größte Chance liegt sicherlich in den weiteren Bereichen der tiefen heißen Biosphäre.

Die Theorie der tiefen heißen Biosphäre wird letztlich mit den Erkenntnissen aus der Tiefe der Erde stehen oder fallen - nicht mit denen aus den Grenzgebieten, obwohl die Grenzgebiete den Reichtum an Möglichkeiten aufzeigen, wie im Fall der Schlote in der Tiefsee, der kalten Erdölquellen, der Methanhydrate und der gasreichen Höhlen. Einer der interessantesten Aspekte der hydrothermalen Schlotgemeinschaften ist, dass es für das Methan, das in diesem Bereich zur Lebenserhaltung beiträgt, keine biogene Erklärung gibt, obwohl bekannt ist, dass Methan in hydrothermalen Schlotflüssigkeiten reichlich vorhanden ist.

Eine biogene Erklärung ist unplausibel, weil es auf, unter oder auch nur in der Nähe der aktiven Rift-Zonen des tiefen Ozeanbodens wenig von der Oberfläche stammendes Sediment gibt. Alle Gesteine so weit unten, wie man sie erforschen möchte, sind magmatisch, was bedeutet, dass sie einst als äußerst heißes, flüssiges Magma durch die Kruste nach oben geflossen sind. Doch in der landläufigen Meinung, die wir alle in der Schule gelernt oder aus unserer Kultur übernommen haben, werden Erdgas und Erdöl lediglich als Überreste von Organismen betrachtet, die von der Geologie zu "fossilen Brennstoffen" umgearbeitet wurden. Erhöhte (aber nicht vulkanische) Temperaturen und erhöhter Druck - beides hervorgerufen durch das Vergraben von organischem Material, das einst lebendig war - vollbringen, wenn genügend Zeit vergeht, dieses Kunststück der Alchemie in den Sedimenten, die organische Reste enthalten (so wird uns gesagt). Methan ist also etwas, das man in Sedimentgestein findet, nicht in Eruptivgestein. Wie kann dann Methan mit den vulkanischen Rift-Zonen des Meeresbodens in Verbindung gebracht werden?

Wenn die Behauptung richtig ist, dass die Erdölvorräte und die meisten Gase in keiner Weise biologischen Ursprungs sind, müssten wir diese Kohlenwasserstoffe sowohl in Eruptiv- als auch in Sedimentgesteinen finden. Erdöl ist kein Eintopf aus gekochten Algen, und obwohl Versuche unternommen wurden, ist es nie in einem Labor aus biologischen Materialien synthetisiert worden. Ein Teil des Methans ist tatsächlich biogenen Ursprungs. Mikroben, die als Methanogene ("Methanerzeuger", im Unterschied zu methanfressenden Methanotrophen) bezeichnet werden, leben in sauerstoffarmen Lebensräumen, wie z. B. im Schlamm von Reisfeldern und im Verdauungstrakt von Rindern, wo sie Methan als Nebenprodukt ihrer Fütterungsstrategien erzeugen. Wir kennen auch die aus Iowa-Mais destillierten Methanol-Benzinzusätze. Aber meiner Meinung nach ist der weitaus größte Teil des Methans nicht biogenen Ursprungs. Vielmehr müssen die Kohlenwasserstoffe als primordiale Bestandteile von Trümmern des Sonnensystems verstanden werden,

aus denen sich die Erde vor etwa 4,5 Milliarden Jahren gebildet hat. Diesem entscheidenden Punkt wird im nächsten Kapitel nachgegangen.

Kapitel 3

Die Tiefe-Erdgas-Theorie

Neue Ideen in der Wissenschaft sind nicht richtig, nur weil sie neu sind. Ebenso wenig sind alte Ideen falsch, nur weil sie alt sind. Eine kritische Haltung ist eindeutig von jedem Wahrheitssuchenden gefordert.[1] Aber man muss sowohl den alten Ideen als auch den neuen gegenüber *gleichermaßen* kritisch sein. Wann immer die etablierten Ideen unkritisch akzeptiert werden und widersprüchliche neue Beweise beiseitegeschoben oder nicht einmal berichtet werden, weil sie nicht passen, ist diese spezielle Wissenschaft in großen Schwierigkeiten. Das ist in verschiedenen Bereichen ziemlich oft passiert. In der Geologie zum Beispiel wurde jemand, der glaubte, dass sich Kontinente oder Teile von Kontinenten in der Vergangenheit bewegt haben könnten, vor 1960 lächerlich gemacht, obwohl es gute Beweise aus magnetischen Gesteinsmessungen gab. Nach 1965 war jeder, der nicht an eine solche Bewegung glaubte, wieder Gegenstand des Spotts. In der Erdölgeologie werden die massiven und überzeugenden Beweise für einen tiefen Ursprung der Fluide immer noch mit Geringschätzung behandelt und dürfen in bestimmten Zeitschriften nicht veröffentlicht werden.

Kohlenstoff und Wasserstoff können eine große Vielfalt von Molekülen bilden, die unterschiedliche Verhältnisse von Kohlenstoff zu Wasserstoff und unterschiedliche Molekülgeometrien haben und alle als Kohlenwasserstoffe bezeichnet werden. Bei den Temperaturen und Drücken an oder in der Nähe der Erdoberfläche sind einige Kohlenwasserstoffe fest (Kohle), einige flüssig (Rohöl) und einige dampfförmig (Erdgas, das überwiegend aus Methan besteht). Flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe werden gemeinhin als Erdöl bezeichnet, das eine große Variation in den Anteilen der verschiedenen Kohlenwasserstoffmoleküle aufweist. Petroleum hat auch vereinheitlichende Merkmale, die auf eine ähnliche Entstehungsweise vermuten lassen. Wie also entsteht Petroleum?

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt würden die meisten Erdölgeologen außerhalb der ehemaligen Sowjetunion sagen, dass die Frage vollständig beantwortet ist - dass Ablagerungen von biologischen Trümmern, die durch geologische Prozesse überarbeitet wurden, für das gesamte natürliche Erdöl verantwortlich sind. Erhöhte Temperaturen (aber nicht auf vulkanisches Niveau) und hohe Drücke in der Tiefe vollbringen, wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, dieses Kunststück der Alchemie und verwandeln die Überreste des Lebens an der Oberfläche, die in den Sedimenten vergraben sind - so sagt man uns. Erdöl wird daher als "fossiler Brennstoff" betrachtet. Doch die Gesamtheit der weithin akzeptierten Fakten über die chemische Zusammensetzung des Erdöls und seine geografischen und geologischen Vorkommen spricht nicht für diese Standardlösung.

Die alternative Erklärung, die ich favorisiere, wird als die abiogene oder erdnahe Gastheorie bezeichnet. Nach dieser Auffassung stammen Erdgas und Erdöl nicht aus biologischen Ablagerungen, sondern aus dem ursprünglichen Material, aus dem die Erde entstanden ist. Das Ziel dieses und des nächsten Kapitels ist es, die Argumente und Beweise für diese Sichtweise darzustellen. Die abiogene Theorie wiederum dient dann als Grundlage für die Diskussion des Titelthemas dieses Buches: die Theorie der tiefen heißen Biosphäre.

Der Ursprung des Erdöls: Zwei widersprüchliche Theorien

Auch wenn die biogene Ursprungstheorie zu vielen Ungereimtheiten führt (auf die in den Kapiteln 4 und 5 eingegangen wird), so ist es doch in der westlichen Welt heute praktisch unmöglich, in der Erdölgeologie eine Forschung zu betreiben, die eine Infragestellung dieser akzeptierten Position impliziert. Ein junger Mensch - wie brillant er auch sein mag - ohne wissenschaftliches Ansehen, der dies versucht, hätte keine Chance, die Begutachtung durch Fachkollegen zu bestehen, weder um Gelder zu erhalten noch um widersprüchliche Ergebnisse zu veröffentlichen. Zu meinem Glück hatte ich mir zu der Zeit, als ich anfing, auf dem Gebiet der Erdölgeologie herumzuschnüffeln, bereits ein gutes Standing in der Physik, einschließlich der Geophysik, und in der Astronomie erarbeitet. Ich war inzwischen in mehrere angesehene wissenschaftliche Gesellschaften gewählt worden, und dieses Ansehen ermöglichte es mir, meine ketzerischen Ansichten über den Ursprung und die Ubiquität von Erdöl und Erdgas zu verbreiten.

Ab 1977 schrieb ich eine Reihe von Abhandlungen zum Thema "Gas aus der Tiefe der Erde", in denen ich meine Gründe für die Annahme erläuterte, dass Erdgas und andere Kohlenwasserstoffe in großer Tiefe entstanden sind - vielleicht 100 bis 300 Kilometer unter der Erdoberfläche.[2] Diese Tiefe liegt fast 100 bis 300 Kilometer tiefer als die Befürworter der biogenen Sichtweise den Ursprung des Erdöls ansiedeln würden, als Folge ihrer zentralen Annahme, dass sich Erdöl aus den Überresten des Oberflächenlebens bildet, die mit den Sedimenten begraben sind. Ich präsentierte die Erdgastheorie zur Zeit der so genannten Energiekrise, die meiner Meinung nach nicht durch einen physischen Mangel an Öl und Gas entstanden war, sondern weil ein Kartell der großen Ölproduzenten sehr stark geworden war, als mehrere hochrangige Erdölgeologen prognostizierten, dass innerhalb von fünfzehn Jahren alle Erdöllagerstätten der Welt erschöpft sein würden. Damals lag es im Interesse der Ölproduzenten, die Produktion zu drosseln und aus den verbleibenden Reserven den größtmöglichen Gewinn zu ziehen. Jetzt, fünfundzwanzig Jahre später, wird die Welt von Öl überschwemmt und verfügt über mehr, als sie benötigt - selbst bei konservativen Schätzungen und selbst wenn man einen deutlich erhöhten Verbrauch projiziert.

Mein Vorschlag (und der vieler russischer Kollegen), dass Erdöl abiogen und tief in der Erde allgegenwärtig ist, fand, obwohl er weit vom Mainstream der Meinung entfernt war, Beachtung - insbesondere von Erdölunternehmern[3] - wegen seiner praktischen Bedeutung weit über die Grenzen der reinen Wissenschaft hinaus. 1982 ergänzte ich die Theorie der tiefen Erdgase in meinem Kopf mit dem Konzept, dass eine "tiefe heiße Biosphäre" auf diesen tiefen Ressourcen gedeiht. Es dauerte ein ganzes Jahrzehnt, bis ich diese Hypothese veröffentlichen konnte.[4] Mit diesem nächsten Schritt gelang es mir jedoch endlich, alle Beweise - einschließlich einiger, die ursprünglich für die biogene Ursprungstheorie sprachen - auf eine Weise zusammenzufügen, die meiner Meinung nach eine zufriedenstellende Auflösung aller paradoxen Informationen bot. Der Ursprung des Erdöls ist seit den 1860er Jahren, als man erstmals entdeckte, dass Erdöl in großen Mengen in den Porenräumen vieler Gesteine vorhanden ist, Gegenstand vieler intensiver und hitziger Debatten gewesen. War es schon bei der Entstehung der Erde vorhanden? Oder ist es eine Flüssigkeit, die sich aus riesigen Mengen von Vegetations- und Tierresten konzentriert, die möglicherweise über Hunderte von Millionen Jahren in den Sedimenten begraben wurden? Für jeden dieser beiden Standpunkte sind Argumente vorgebracht worden, und obwohl sie sich zu widersprechen scheinen, hat jede Argumentationslinie ihre Stärken.

Die biogene Theorie besagt, dass in den Sedimenten vergrabene biologische Ablagerungen im Laufe der Zeit zu Erdöl und Erdgas zerfallen und dass sich dieses Erdöl sich dann in den Porenräumen der Sedimentgesteine in den obersten Schichten der Kruste anreichert. Bei der Suche nach Erdöl ging man von dieser Theorie des biologischen Ursprungs aus, so dass das Vorhandensein von biologischem Material in den Sedimenten als ein wichtiger Indikator für schürfwürdige Schichten angesehen wurde. Wurden Erdölvorkommen in Gesteinen gefunden, die kein Material besaßen, aus dem die Öle entstanden sein könnten, wurde einfach akzeptiert, dass Erdöl und Erdgase oft über weite Strecken wandern und das Ursprungsgestein daher manchmal nicht bestimmbar ist.

Die biogene Theorie über den Ursprung des Erdöls wurde um die 1870er Jahre herum weit verbreitet, als man annahm, dass die Erde als ein sehr heißer Körper, vielleicht ein Körper aus geschmolzenem Gestein, entstanden sei. Wenn dies richtig gewesen wäre, dann hätten keine Kohlenwasserstoffe, die mit dem heißen Gesteinsmaterial geliefert wurden, überleben können; sie wären alle zu CO_2 und H_2O oxidiert worden. Solange diese Art der Erdentstehung die vorherrschende Ansicht war, war ein abiogener Ursprung des Erdöls, gebildet aus Materialien, die sich bei der Entstehung der Erde angesammelt hatten, kein haltbarer Standpunkt. Zu dieser Zeit schien die Bildung von Erdöl aus der Vegetation, nachdem die Oberfläche ausreichend abgekühlt war, die einzig mögliche Erklärung zu sein. Die spätere Entdeckung von Molekülen mit eindeutig biologischem Ursprung in allen natürlichen Ölen stärkte die biogene Theorie erheblich.

Die gegenwärtige Theorie über die Entstehung der Erde besagt, dass sie sich durch die Zusammenfügung von kalten festen Stücken bildete, die aus einem die Sonne umgebenden Nebel kondensierten. Ein Großteil des so gewonnenen Materials wäre einer übermäßigen Erhitzung entgangen, und eine abiogene Lösung schien nun möglich; aber die biogene Theorie war zu diesem Zeitpunkt so fest verankert, dass gegenteilige Beweise beiseitegeschoben wurden. Selbst als in den 1940er Jahren das Vorhandensein vieler Kohlenwasserstoffe auf anderen planetaren Körpern des Sonnensystems entdeckt wurde (Körper, die sie nicht von der Vegetation erworben haben konnten), wurde weiterhin behauptet, dass nur unsere Erde Kohlenwasserstoffe aus einer Quelle erwarb, die nur hier zu finden war: der Vegetation.

Wenn nun Erdöl oder Erdgas in Eruptivgesteinen (Gesteinen, die aus einer Schmelze gefroren sind) gefunden wird, geht man davon aus, dass die Kohlenwasserstoffe aus einem sedimentären "Quellgestein" eingewandert sind. Nach dieser Auffassung bieten Eruptivgesteine, die unter den tiefsten Sedimentgesteinen liegen, keinerlei Aussicht auf Kohlenwasserstoffe, und so wurden nur sehr wenige Bohrungen in diese "Grundgesteine" niedergebracht. Fast alle Bohrungen wurden in Sedimentgestein niedergebracht, so dass fast alles Öl aus Sedimentgestein gefördert wurde. Schon bald wurde diese Tatsache als Beweis dafür genommen, dass Sedimente für die Ölförderung unerlässlich seien. In der Tat waren Sedimentschichten für die Produktion eines Großteils des heutigen Öls wesentlich, nicht weil in den Sedimenten notwendigerweise mehr Öl vorhanden ist, sondern weil die Ölgesellschaften dort bohren wollten. Der Glaube an den biogenen Ursprung des Erdöls führte also zu einer sich selbst erfüllenden Prophezeiung.

Die Theorie des biologischen Ursprungs von Kohlenwasserstoffen wurde in den Vereinigten Staaten und in weiten Teilen Europas so sehr favorisiert, dass sie die gegenteilige Sichtweise effektiv ausschloss. Dies war in den Ländern der ehemaligen Sowjetunion nicht der Fall. Dort wurde seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts auf beiden Seiten der

Debatte viel Arbeit geleistet. Bei dem Versuch, diese Frage zu klären, scheint die Sowjetunion gegenüber wissenschaftlichen Meinungsverschiedenheiten nachsichtiger gewesen zu sein als die westlichen Länder, wahrscheinlich weil Mendelejew, der verehrte russische Chemiker, die abiogene Ansicht unterstützt hatte. Die Argumente, die er vorbrachte, sind heute sogar noch stärker, wenn man bedenkt, dass wir jetzt über viel mehr Informationen verfügen.

Die abiogene Theorie besagt, dass Kohlenwasserstoffe ein Bestandteil des Materials waren, aus dem die Erde vor etwa 4,5 Milliarden Jahren durch Akkretion von Festkörpern entstand. Mit zunehmender innerer Hitze wurden Flüssigkeiten und Gase freigesetzt, und da sie eine geringere Dichte als das Gestein hatten, wurden sie durch Auftriebskräfte nach oben getrieben. Unter günstigen Bedingungen würde die Reise nach oben aus den Ursprungsregionen in porösen Gesteinen in Tiefen, die unsere Bohrer erreichen können, vorübergehend gestaut werden, woraus wir dann kommerzielles Erdöl gewinnen. In vulkanischen Regionen haben wir eine andere Situation. Dort können sich die Flüssigkeitskanäle ohne Unterbrechung bis in große Tiefen erstrecken, da die Druckunterschiede zwischen dem festen Gestein und dem nahezu gleich dichten Magma gering sein werden. Wenn Methan aus tieferen Schichten in einen solchen Kanal eintritt, steigt es als eine Masse von Blasen auf, und jede Blase hat beim Aufstieg mehrmals Kontakt mit der frischen Magmaoberfläche. Was auch immer dort an lose gebundenem Sauerstoff vorhanden sein mag, wird von den Blasen eingefangen und oxidiert bei der hohen Temperatur das Methan zu CO_2 und Wasser. So ist es nicht verwunderlich, dass die Emissionen von Vulkanen in ruhigen Zeiten hauptsächlich CO_2 und Wasser und nur einen kleinen Prozentsatz an Methan produzieren (bei den meisten Vulkanen werden 2-5 Prozent angegeben, bei einigen jedoch viel mehr; bei den Azoren wird ein Wert von 17 Prozent genannt). Aber bei größeren Ausbrüchen dieser gleichen Vulkane ist oft eine große Menge an brennbarem Gas beteiligt, und Flammen wurden bei vielen solchen Gelegenheiten gesehen. Der am deutlichsten erkennbare Fall war bei Eruptionen unter der Meeresoberfläche eines der Krakatau-Vulkane in der Sundastraße, Eruptionen, die nicht durch die Wasseroberfläche brachen, sondern zu Flammen führten, die über große Bereiche auf der Oberfläche tanzten. In diesem Fall kann es keine Verwechslung zwischen Flammen und vulkanischem Sprühnebel aus rotglühender Asche geben, wie es bei vielen Ereignissen, bei denen das Vorhandensein von Flammen berichtet wurde, nahegelegt wurde. Scheinbar zuverlässige Berichte von Flammen gibt es auch von mittelamerikanischen Vulkanen, von Santorin im Mittelmeer nördlich von Kreta und vom großen afrikanischen Graben. (Die Chance, die Flammen bei einer Eruption zu sehen, hängt davon ab, dass der Wind den dichten Rauch zur Seite der eher senkrecht stehenden Flamme treibt).

Bei einer heftigen Eruption gibt es nicht die kleinen Blasen, die in ruhigen Zeiten aufsteigen; stattdessen gibt es große Gasfahnen, die durch das geschmolzene Gestein nach oben rasen. das geschmolzene Gestein. Die Kontaktfläche zwischen Gas und Gestein wird viel kleiner und die Zeit dieses Kontakts viel kürzer sein, wodurch die Menge der Oxidation, die stattfinden kann, reduziert wird. Alles in allem deutet eine Vielzahl von Hinweisen darauf hin, dass Kohlenwasserstoffe oder Wasserstoff die Hauptbestandteile der vulkanischen Gase sind. Das CO_2, das in ruhigen Zeiten häufig in Vulkanen zu sehen ist, ist kein Beweis dafür, dass CO_2 das primäre Kohlenstoffgas ist, welches der Erdoberfläche zugeführt wird. Wo die Emission von Gasen in die Atmosphäre direkt gemessen werden kann, ist Methan fast immer das dominierende Kohlenstoffgas, es sei denn, die Messzone nähert sich einem Gebiet mit aktivem Vulkanismus, und dort dominiert oft CO_2. (Ich werde auf diesen Punkt bei der Erörterung von Schlammvulkanen in Kapitel 8 zurückkommen.)

Kohlenwasserstofffahnen, die ihren Weg an die Erdoberfläche finden, ohne auf Magma zu treffen, können unterwegs oxidiert werden oder auch nicht. In jedem Fall werden sie bald nach dem Kontakt mit der sauerstoffreichen Atmosphäre oxidiert. Das bedeutet, dass das endgültige Schicksal der primordialen Kohlenwasserstoffe darin besteht, zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert zu werden.

Die abiogene Theorie der Erdölbildung hängt von der Wahrheit von fünf zugrunde liegenden Annahmen ab. **Erstens**: Kohlenwasserstoffe oder Verbindungen, die bei den hohen Drücken in der Tiefe der Erde in Kohlenwasserstoffe hätten umgewandelt werden können, müssen ein gemeinsamer Bestandteil der Urmaterialien gewesen sein, aus denen sich die Erde gebildet hat. **Zweitens** dürfen die primordialen Kohlenwasserstoffe in den viereinhalb Milliarden Jahren seit der Entstehung der Erde nicht nachträglich durch die Einwirkung der in den Gesteinen der Erdkruste gebundenen erheblichen Mengen an Sauerstoff dissoziiert und vollständig zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert worden sein. **Drittens** müssen die Kohlenwasserstoffe bei den Kombinationen aus hoher Temperatur und hohem Druck, die tief im Erdinneren herrschen, chemisch stabil sein. **Viertens** müssen die Kohlenwasserstoff-Fluide geeignete Poren gefunden oder geschaffen haben, in denen sie in der Tiefe existieren und durch die sie sich auf ihrer Reise nach oben bewegen können, angetrieben durch Auftriebskräfte aufgrund ihrer geringen Dichte im Vergleich zu der des Gesteins. **Fünftens** und letztens muss es in großer Tiefe noch eine Quelle für Kohlenwasserstoffe geben. Können diese fünf Annahmen alle gültig sein?

Fünf Annahmen, die der Tiefe-Erde-Gas-Theorie zugrunde liegen

1. Kohlenwasserstoff stammt aus der Urmaterie der Erde

Die erste Annahme, die der abiogenen Sichtweise der Erdölentstehung zugrunde liegt - dass Kohlenwasserstoffe ein gemeinsamer Bestandteil des Urmaterials waren, aus dem die Erde entstand - ist heute unter Astronomen und Planetenforschern, deren Forschungsgebiet sich auf die Weite dieses Sternsystems und darüber hinaus ausdehnt, allgemein bekannt. Aber es muss daran erinnert werden, dass die biogene Theorie der Erdölbildung in den 1870er Jahren entwickelt wurde, bevor Wissenschaftler eine Vorstellung davon hatten, das so genannte "organische" Moleküle, einschließlich Kohlenwasserstoffe, tatsächlich im Universum reichlich vorhanden sind. Jahrhunderts bekannt, dank der Erfindung von Spektrographen, die Wellenlängen im optischen und Radioteil des elektromagnetischen Spektrums analysieren. Mit diesen Geräten wurden chemische Bestimmungen von fernen Körpern vorgenommen, indem die spektralen Signaturen des Sonnenlichts erfasst wurden, das entweder durch eine Planetenatmosphäre gefiltert oder, weniger genau, von den Oberflächen fester Körper ohne Atmosphäre reflektiert wurde. Die Konsequenzen dieser Entdeckungen sind noch nicht vollständig in das geologische Denken der Gegenwart integriert worden. Die Erde ist schließlich ein Planet, und daher sollte die Geologie in erster Linie als eine Teilmenge der planetarischen Wissenschaft betrachtet werden, aber diese Ansicht hat sich nur langsam durchgesetzt. Da ich einen guten Teil meines Arbeitslebens als Astronom verbracht habe, wurde ich schon früh auf die Bedeutung und die Zuverlässigkeit dieser Beobachtungen aufmerksam gemacht.

Was haben die spektrographischen Untersuchungen ergeben? Im Wesentlichen haben sie gezeigt, dass Kohlenstoff das vierthäufigste Element im Universum und auch in unserem Sonnensystem ist (nach Wasserstoff, Helium und Sauerstoff). Unter den planetaren Körpern kommt Kohlenstoff meist in Verbindungen mit Wasserstoff vor - Kohlenwasserstoffe -, die bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken gasförmig, flüssig oder fest sein können. Astronomische Techniken haben somit klare und unbestreitbare Beweise dafür erbracht, dass Kohlenwasserstoffe Hauptbestandteile von großen und kleinen Körpern innerhalb unseres Sonnensystems (und darüber hinaus) sind. Die größten Mengen finden sich in den massereichen äußeren Planeten und ihren Trabanten. Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun haben in ihren ausgedehnten Atmosphären große Beimischungen von Kohlenstoff, hauptsächlich in Form von Kohlenwasserstoffen - vor allem Methan. Titan, ein Mond des Saturns, hat Methan und Ethan (CH_4 und C_2H_6) und einige andere Kohlenwasserstoffmoleküle in seiner Atmosphäre. Ähnlich wie Wasser in unserer eigenen Atmosphäre sind diese Kohlenwasserstoffmoleküle für die Wolken verantwortlich, die wir auf Titan sehen, vermutlich als Regen auf Methan-Ethan-Seen oder Meere. Die Temperatur in dieser Entfernung von der Sonne (9,5 mal weiter entfernt als die Erde und damit nur etwas mehr als 1 Prozent der Strahlungsintensität, die wir hier erhalten) bringt diese Verbindungen gerade in den Bereich, in dem sie in flüssiger oder dampfförmiger Form vorliegen können, während Wasser auf der Oberfläche dort natürlich nur als sehr kaltes Eis vorhanden sein könnte.

Planeten und ihre Monde sind nicht die einzigen Reservoire von Kohlenwasserstoffen in unserem Sternensystem. Viele der Asteroiden - der Schwarm kleinerer planetarer Körper zwischen Mars und Jupiter - scheinen ebenfalls Kohlenwasserstoffe auf ihren Oberflächen und wahrscheinlich auch in ihrem Inneren zu haben. Der kürzliche Vorbeiflug einer europäischen instrumentierten Raumsonde am Halley'schen Kometen deutet stark darauf hin, dass auch die Oberfläche dieses Eiskörpers mit Kohlenwasserstoffen bedeckt ist. In der Tat scheinen alle planetarischen Körper des Sonnensystems ursprünglich durch die Anhäufung von Festkörpern entstanden zu sein.

Hier bei uns finden wir einen weiteren Beweis dafür, dass Kohlenwasserstoffe tatsächlich ein gemeinsamer Bestandteil der akkretierenden Erde waren. Meteoriten, die mit der Erde kollidieren, liefern auch heute noch Proben der alten Materialien, aus denen sich die Planeten gebildet haben. Diejenigen der Klasse der kohlenstoffhaltigen Chondrite enthalten einige flüchtige Substanzen, und es wird weithin angenommen, dass diese Klasse die Erde mit dem größten Teil ihres Bestandes an flüchtigen Stoffen versorgt hat. Obwohl Kohlenstoff in anderen Meteoritentypen ein untergeordneter Bestandteil ist, ist er in den kohlenstoffhaltigen Chondriten zu mehreren Prozent vorhanden, meist in nicht oxidierter Form, mit einem gewissen Anteil in Form von Kohlenwasserstoffverbindungen. Der russische Isotopenforscher E. M. Galimov hat überzeugend dargelegt, dass die Erde einen guten Teil des kohlenstoffhaltigen Chondritenmaterials erworben hat, denn viele Isotopenverhältnisse flüchtiger Elemente in unserer Atmosphäre stimmen eng mit den Verhältnissen in diesen Meteoriten überein, unterscheiden sich aber wesentlich von den Verhältnissen, die in anderen meteoritischen Materialien gefunden werden. Galimov zeigt, dass die Isotopenverhältnisse von zwei stabilen Isotopen des Wasserstoffs und des Kohlenstoffs sowie von Neon, Argon und Xenon (drei Edelgase) auf der Erde denen in den kohlenstoffhaltigen Chondriten ähneln, sich aber erheblich von den Werten anderer meteoritischer Materialien unterscheiden; für Neon beträgt der Unterschied sogar einen Faktor von 500. Indem Galimov sich bei diesen Vergleichen auf die edlen (chemisch inerten)

Gase konzentrierte, versicherte er sich, dass er Samenkuchen sehen würde, die nicht mit dem Durcheinander verschiedener Materialien der Kruste kontaminiert waren.[5]

Es ist also klar, dass das Vorkommen von Kohlenwasserstoffmolekülen innerhalb der Erde keineswegs eine Anomalie ist. Es wäre in der Tat überraschend, wenn die Erde ihre Kohlenwasserstoffe nur aus einer Quelle erhalten hätte, die die Biologie aus einem anderen kohlenstoffhaltigen Gas - Kohlendioxid - entnommen hätte, das von photosynthetisierenden Organismen aus der Atmosphäre zur Herstellung von Kohlenhydraten gesammelt und dann irgendwie von der Geologie zu Kohlenwasserstoffen umgearbeitet worden wäre. All dies, während die planetarischen Körper ohne Oberflächenleben ihre Kohlenwasserstoffgaben durch rein abiogene Ursachen erhalten hätten. (Denken Sie daran, dass Kohlenstoff ein Element ist, und keine Prozesse auf der Erde - außer von Menschen gebauten Kernreaktoren - können ihn erzeugen. Ich bin mir sicher, dass es keine großen stagnierenden Sümpfe auf Titan oder Pluto gab.)

Konventionelles Denken innerhalb der Astronomie, zusammen mit Meteoritenstudien, bestätigt somit die erste Schlüsselannahme der abiogenen Theorie. Kohlenwasserstoffe - und nicht oxidierter Kohlenstoff - waren wichtige Bestandteile der Materialien, aus denen die Erde aufgebaut war. Oxidierter Kohlenstoff war es nicht. Es ist daher eine seltsame Annahme, Kohlendioxid als die primäre Kohlenstoffquelle zu betrachten, die die Erde für ihr entstehendes Leben bereitstellte. Für das Leben an der Oberfläche ist Kohlendioxid in der Tat die Kohlenstoffquelle, aber daraus folgt nicht zwangsläufig, dass der Atmosphäre Kohlenstoff in dieser Form zugeführt wurde, und zwar ständig und über den größten Teil der geologischen Zeit. Die stark sauerstoffhaltige Erdatmosphäre hätte dafür gesorgt, dass die aufsteigenden Kohlenwasserstoffe schon bald nach ihrem Austritt aus der Erdkruste in Kohlendioxid umgewandelt wurden. In tiefen Schichten in Bohrlöchern sind Kohlenwasserstoffe viel häufiger als Kohlendioxid, eine Beobachtung, die die Ableitungen aus astronomischen und meteoritischen Nachweisen bestätigt.

2. Die Erde war nur einer teilweisen Schmelze unterworfen.

Was ist mit der zweiten Annahme, dass die Kräfte, die in einer jungen, sich verdichtenden Erde und dann mehr als vier Milliarden Jahre lang am Werk waren, die Materialien nicht erhitzt und in einen Zustand des chemischen Gleichgewichts umgearbeitet haben? Könnte ein signifikanter Anteil dieser ursprünglichen Kohlenwasserstoffe unoxidiert geblieben sein?

Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts dachte man, die Erde habe sich als heißer Körper gebildet, sie sei eine Kugel aus flüssigem Gestein gewesen - als solche zweifellos gut durchmischt - und habe sich dann allmählich abgekühlt, wobei sich eine differenzierte Kruste gebildet habe, die einen homogenen Mantel überlagert habe. Bei einer solchen Entstehungsgeschichte hätten keine primordialen Kohlenwasserstoffe den geschmolzenen Zustand überleben können. Selbst wenn im Entstehungsprozess zunächst Kohlenwasserstoffe zugeführt worden wären, dann wären sie nach der Sichtweise der geschmolzenen Erde sicherlich bald darauf zerstört worden. Um die Zufuhr von überschüssigem Kohlenstoff an die Oberfläche zu erklären, dachten die Verfechter dieser Theorie nur an oxidierten Kohlenstoff, weil das die stabile Form wäre, die man in einem solchen Fall erwarten würde. Tatsächlich wurde Kohlendioxid aus Vulkanen gefunden, was diese Sichtweise offenbar bestätigte.

Es ist nun ziemlich klar geworden, dass unser Planet, wie auch die anderen inneren Planeten und die Satelliten der äußeren Planeten, alle als feste Körper aus Festkörpern entstanden sind, die aus einer gasförmigen Planetenscheibe kondensiert waren. Die primären Kondensate, die in ihrer Größe von kleinen Körnern bis hin zu asteroidengroßen Planetismen reichten, trugen alle zur Bildung der endgültigen Erde bei. In der frühen Erde fand ein teilweises Aufschmelzen statt, wodurch Schmelzen geringerer Dichte ihren Weg an die Oberfläche fanden, während vermutlich Schmelzen höherer Dichte zum Zentrum hin absanken. Die Wärme, die diese Schmelze erzeugte, war das Produkt der im Material enthaltenen Radioaktivität sowie der Wärme, die aus der Gravitationskompression resultierte. Sobald die partielle Schmelze stattfand, kamen zwei weitere Wärmequellen ins Spiel. Zum einen wurde Gravitationsenergie freigesetzt, da sich die Materialien bewegten und sich nach ihrer Dichte sortierten. Zum anderen gab es die chemische Energie der spontanen Reaktionen zwischen den sich vermischenden Materialien, da die ursprünglichen Materialien, die als kalte Objekte akkretiert wurden, nicht in den Konfigurationen mit der niedrigsten chemischen Energie gewesen wären. Die partiellen Schmelzen mit niedriger Dichte erzeugten die felsige Schicht, die wir als Kruste bezeichnen. Diese Kruste bedeckt fast die gesamte Oberfläche, und bei jedem Grundgestein konnte man sehen, dass es sich einst um flüssiges Magma oder ein teilweise geschmolzenes Aggregat handelte, so dass die Wissenschaftler den Eindruck hatten, dass die Erde aus einer anfänglichen Schmelze gefroren war.[6]

Dieses Bild einer einst flüssigen Erde wurde übernommen und prägte einen Großteil der Diskussion in der Frühzeit der Geologie. Auch wenn inzwischen klar ist, dass es sich nur um eine partielle Aufschmelzung handelte und dass der Großteil des Planeten nie geschmolzen war, ist die gründliche Neubewertung der geologischen Theorie, die eine solche Veränderung hätte inspirieren sollen, nie erfolgt. Nirgendwo wird dies deutlicher als in der Diskussion über den Ursprung der flüchtigen Substanzen auf der Oberfläche: das Wasser der Ozeane, der Stickstoff der Atmosphäre und die kohlenstoffhaltigen Fluide, die für eine große Anreicherung der Oberfläche mit Kohlenstoff verantwortlich gewesen zu sein scheinen.

Innerhalb einer ursprünglich geschmolzenen Erde wären die flüchtigen Stoffe in der ersten Phase an die Oberfläche gekommen. Später, wenn sich ein solcher Körper abgekühlt hätte, wäre eine erneute Zufuhr von flüchtigen Stoffen von unten kaum zu erwarten gewesen. Bei einem kalten Körper, der sich aufheizt, wäre hingegen das Gegenteil zu erwarten: Aufeinanderfolgende Schichten würden Temperaturen erreichen, bei denen die flüchtigen Stoffe ausgetrieben werden würden. Solange die Innentemperaturen in irgendeinem Teil des Körpers ansteigen, ist mit weiteren Ausgasungsprozessen zu rechnen. Außerdem gäbe es ganz unterschiedliche Erwartungen an die chemische Natur der verschiedenen flüchtigen Substanzen. Auf einer heißen frühen Erde würden die meisten Fluide schon früh in die niedrigste chemisch-energetische Konfiguration gebracht werden und könnten später keine Energiequelle mehr darstellen. Im Gegensatz dazu würden auf einem kalten Körper, der sich aufheizte, die entstehenden Fluide oft aus dem chemischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung sein und könnten somit eine Quelle chemischer Energie sein.[7]

Wie in Kapitel 2 erwähnt, ist eine Quelle chemischer Energie aus dem Erdinneren eine grundlegende Prämisse für die Theorie der tiefen heißen Biosphäre. Wenn es keine chemische Energie gibt, die ausgenutzt werden kann - das heißt, wenn alle Substanzen innerhalb der Erde in ein chemisches Gleichgewicht gekommen sind -, dann wäre die einzige

Energiequelle für das Leben auf der Erde das Sonnenlicht, das auf die Oberfläche fällt. Das Verständnis der Oxidationsstufe des Kohlenstoffs in der Erde ist daher von zentraler Bedeutung.

Die Frage nach der Stabilität des irdischen Urvorrats an Kohlenwasserstoffen gegen Oxidation - d.h. gegen die Verbindung mit dem in den Silikaten und anderen Mineralien der Gesteine enthaltenen Sauerstoff - ist eng mit den Details des Ausgasungsprozesses verbunden. Wenn die Gase in Magmaregionen aufsteigen, dann würde sich (wie wir bereits besprochen haben) ein chemisches Gleichgewicht zwischen den Kohlenwasserstoffen und dem Magma einstellen, und dies würde normalerweise die Oxidation der Kohlenwasserstoffgase begünstigen. So ist es nicht verwunderlich, dass Vulkane im Allgemeinen Kohlenstoff hauptsächlich in Form von CO_2 emittieren, mit nur geringen Mengen als Methan, CH_4.

Dort, wo sich die Gase ihren Weg durch festes Gestein bahnen, ist das Schicksal der Kohlenwasserstoffe jedoch ein ganz anderes. In diesem Fall ist kein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Gestein und dem Gas zu erwarten. Viele Forscher waren davon ausgegangen, dass sich ein solches Gleichgewicht eingestellt hat, und das würde einen Aufstieg von Methan ausschließen; es wäre in der Tiefe zu Kohlendioxid geworden. Anstatt in einem Gebräu aus Magma aufgewühlt zu werden und dabei Molekül für Molekül auf ein potenzielles Oxidationsmittel zu treffen, kommt jedes Gas, das stattdessen durch Feststoffe aufsteigt, nur mit einer sehr begrenzten Menge an Gestein an den Oberflächen der Poren in Kontakt. Ein ausreichender Strom von Kohlenwasserstoffen, der sich über einen ausreichenden Zeitraum durch Poren und Risse bewegt, zieht den gesamten verfügbaren Sauerstoff ab, so dass Kohlenwasserstoffe, die später denselben Wegen nach oben folgen, ohne Beeinträchtigung passieren können. Das bedeutet, dass aktive Vulkane zwar die naheliegendsten Orte sind, um Gase zu beproben, die aus großen Tiefen aufgestiegen sind, dass sie aber aufgrund von Oxidationsprozessen die schlechtesten Orte sind, um eine repräsentative Messung der Zusammensetzung von Gasen und anderen Fluiden in der Tiefe zu erhalten. Die besten Orte, um eine repräsentative Ablesung zu erhalten, sind Gebiete, die von Vulkanen und allen anderen Anzeichen von Magma entfernt sind, das sich darunter befindet - also durchschnittliche Gebiete des Ozeanbodens und der Kontinentaloberfläche.

Die Gastheorie der Tiefenerde hängt also zum Teil von der Gültigkeit einer zweiten Annahme ab. Kohlenwasserstoffe müssen nicht nur Urbestandteile der neu entstandenen Erde gewesen sein; sie dürfen auch nicht nachträglich vollständig oxidiert worden sein. Die Erde muss nur einer partiellen Schmelze unterworfen gewesen sein.

3. Kohlenwasserstoffe sind in großer Tiefe stabil.

Nun wenden wir uns der dritten Annahme zu, von der die abiogene Theorie der Kohlenwasserstoffbildung abhängt, nämlich der thermodynamischen Stabilität von Kohlenwasserstoffen in großer Tiefe. Früher dachte man, dass Temperaturen über 600 °C selbst den einfachsten und hitzebeständigsten Kohlenwasserstoff, Methan (CH_4), dissoziieren würden und dass Temperaturen von nur 300 °C ausreichen würden, um die meisten schweren Kohlenwasserstoffkomponenten des natürlichen Erdöls zu zerstören. Da solche Temperaturen in der Kruste nur in einigen zehn Kilometern Tiefe erreicht werden, schien es sinnlos, über einen Ursprung der Kohlenwasserstoffe aus nicht-biologischen Quellen in tieferen Schichten zu diskutieren. Wenn der Ursprung in den oberen und kühleren Teilen der

Kruste gefunden werden musste, dann gab es eigentlich keine Alternative zur biogenen Theorie.

Diese konventionelle Ansicht über die thermische Instabilität von Kohlenwasserstoffen blieb unangefochten, weil die Kosten für die Durchführung von Experimenten bei den entsprechenden Drücken unerschwinglich waren und die Bedeutung einer solchen Untersuchung nicht erkannt wurde. Berechnungen der thermischen Stabilität, die im Westen angestellt wurden, berücksichtigten nicht die wesentlichen Auswirkungen des Drucks: Hoher Druck stabilisiert Kohlenwasserstoffe stark gegen thermische Dissoziation. Die Frage nach der Stabilität der Kohlenwasserstoffe muss also nicht nur bei den Temperaturen, sondern auch bei den Drücken beurteilt werden, die in den verschiedenen Tiefen herrschen.

Thermodynamische Berechnungen des Geowissenschaftlers E. B. Chekaliuk, die 1980 in einer russischen Zeitschrift veröffentlicht wurden, zeigen, dass Methan bis zu einer Tiefe von 300 Kilometern einer vollständigen Dissoziation widerstehen würde, außer in vulkanischen Regionen, die den normalen Temperaturgradienten der Erde durchbrechen.[8] Vielleicht wäre eine Tiefe von etwa 600 Kilometern die untere Grenze für die mögliche Existenz von Methan innerhalb der Erde.[9] (Siehe Abbildung 3.1.)

Was ist mit den schwereren Kohlenwasserstoffmolekülen, die den Großteil des Erdöls ausmachen? Thermodynamische Berechnungen, die in Russland und in der Ukraine durchgeführt wurden, legen nicht nur nahe, dass die meisten dieser Moleküle in den Druck- Temperatur-Regimen, die in Tiefen zwischen 30 und 300 Kilometern vorherrschen, stabil sind, sondern auch, dass sie entstehen würden, wenn eine Mischung aus einfachen Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen in diesen Tiefen vorhanden wäre.

In einer Tiefe von, sagen wir, 200 Kilometern wäre ein Gemisch von Kohlenwasserstoffmolekülen die zu erwartende Gleichgewichtskonfiguration - und das trotz thermischer Bedingungen, die ohne Berücksichtigung des Drucks weit über der Schwelle für die Dissoziation dieser Moleküle liegen würden. Die detaillierte Chemie der resultierenden Moleküle würde von Druck, Temperatur und dem Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis abhängen. Andere Atome, die ebenfalls vorhanden sein könnten, wie Sauerstoff und Stickstoff, würden mit dem Kohlenstoff und Wasserstoff eine Vielzahl komplexer Moleküle bilden.

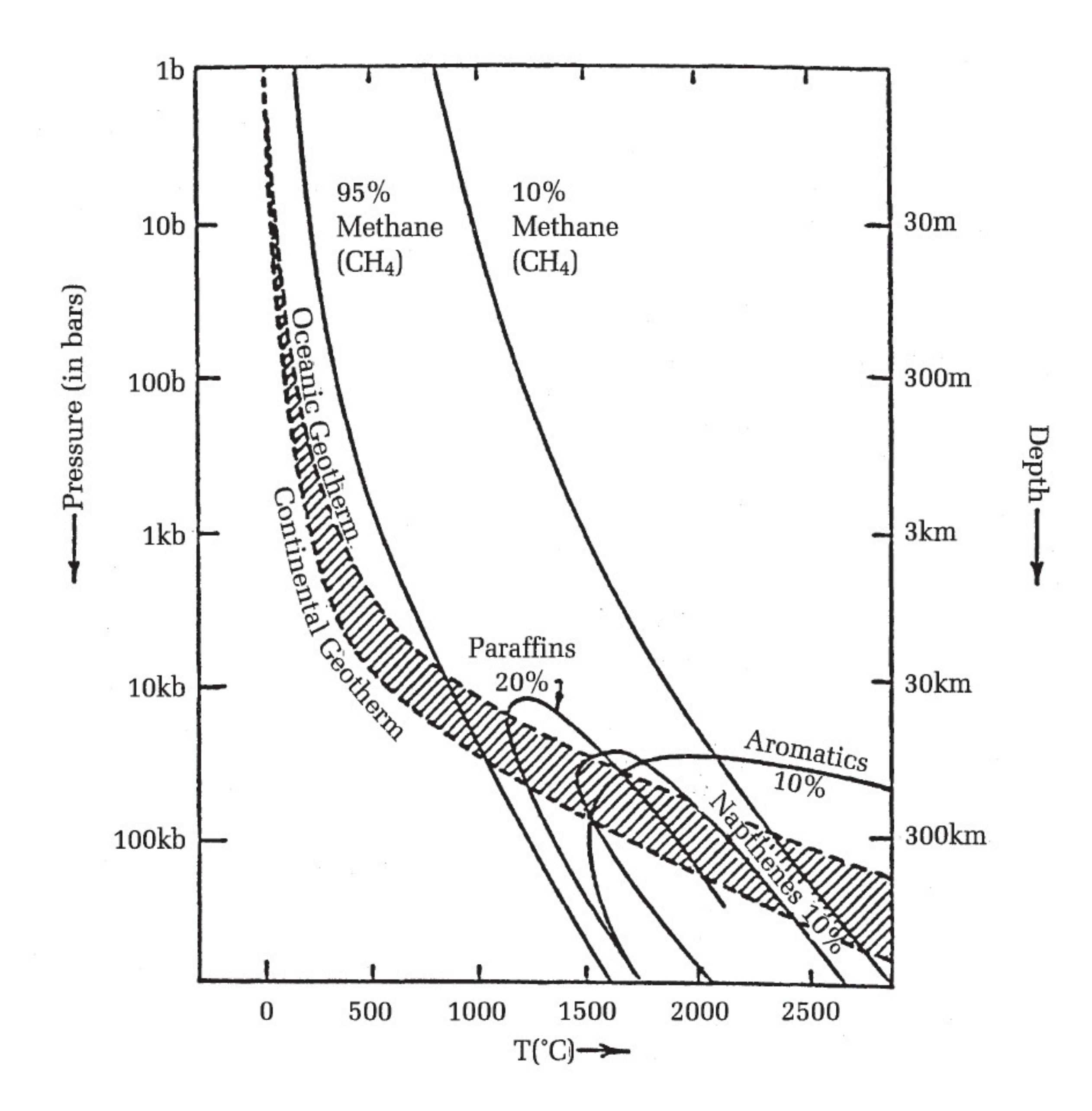


Abbildung 3.1
Stabilität von Kohlenwasserstoffen bei Temperaturen und Drücken in der Erde (aus Chekaliuk, 1976). Die vertikale Skala auf der linken Seite stellt den Druck in bar dar, wobei 1 bar dem Druck der Atmosphäre entspricht; der obere Teil des Diagramms stellt also die Erdoberfläche dar. Die vertikale Skala auf der rechten Seite stellt die Tiefe dar, die dem Druck entspricht, wobei eine mittlere Dichte des Gesteins von 3,5-mal der Dichte des Wassers angenommen wird. Die Zunahme der Temperatur mit der Tiefe in der Erde wird als "Geothermie" bezeichnet, und der Bereich zwischen den beiden Geothermen ist der Bereich, der die Temperatur-Tiefen-Beziehung an verschiedenen Orten darstellen könnte. Der tiefe Boden unter den Ozeanen ist im Allgemeinen heißer als der tiefe Boden in der gleichen Tiefe auf den Kontinenten, wie in der Abbildung zu sehen ist. Methan (CH_4) ist das stabilste Molekül unter den Kohlenwasserstoffen; der größte Teil davon würde in allen Tiefen bis zu 300 Kilometern überleben, sofern die Temperatur dort 20000C nicht übersteigt. Für die anderen Komponenten des natürlichen Erdöls - Paraffine, Aromaten und Naphthene - sind die Gleichgewichtsprozentsätze angegeben; das sind die Werte, die am ehesten aus einer Mischung von Wasserstoff und Kohlenstoff entstehen würden. Methan,

das aus großer Tiefe strömt, könnte in Lösung signifikante Anteile dieser Erdölkomponenten mitbringen.

Es ist sehr interessant zu bedenken, dass komplexe Moleküle aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff auch vom Leben hergestellt werden - und das Leben kann dieses Kunststück sogar bei den niedrigen Drücken vollbringen, die an oder nahe der Erdoberfläche herrschen. Diese Moleküle nennen wir Proteine. Bei den sehr großen Drücken, die in der Tiefe herrschen, könnte noch ein weiterer Grad der molekularen Komplizierung auftreten.
Metallatome, die in solchen Tiefen vorhanden sind, würden sich mit den Kohlenwasserstoffen zu metallorganischen Verbindungen verbinden (eine Perspektive, die wir in Kapitel 7 untersuchen werden, weil sie durchaus mit der Bildung von oberflächennahen Lagerstätten konzentrierter Metalle zu tun haben könnte). Enzyme, Katalysatoren für biochemische Reaktionen, bestehen oft aus Metallatomen in komplexen Molekülen aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff.

4. Poren im tiefgelegenen Felsgestein.

Was ist mit der einfachen physikalischen Behauptung, dass eine riesige Menge an Kohlenwasserstoffen tatsächlich in großer Tiefe in der Erdkruste verbleiben kann, weil in diesen Bereichen tatsächlich Porenräume existieren, die ihr Vorhandensein beherbergen, und Mechanismen existieren, die ihren Fluss erleichtern?

Ich interessierte mich zum ersten Mal in den frühen 1950er Jahren für die Frage, ob Poren in großen Tiefen existieren, als ich noch in Cambridge war. Was mein Interesse weckte, war eine offensichtlich falsche Aussage, auf die ich in einem Geologie-Lehrbuch gestoßen war, das ich mehr aus Neugierde als mit einer bestimmten Frage im Hinterkopf gelesen hatte. Dort hieß es, dass Gesteine, die porös genug sind, um Flüssigkeiten zu halten und weiterzuleiten, auf eine dünne äußere Schicht der Kruste beschränkt sein müssen, nicht viel tiefer als die Tiefen, in die die tiefsten Erdölbohrungen vordringen. Darunter, so erklärte das Lehrbuch, wäre das Gewicht des Deckgebirges so groß, dass selbst die stärksten Gesteine in einem Maße zerkleinert würden, dass alle Porenräume eliminiert würden; dort könnten keine Fluide enthalten sein, und keine Bewegung von Fluiden durch alle tieferen Gesteine wäre möglich. Es wurde eine Berechnung angestellt, die die gemessenen Brechkräfte der Gesteine zeigte und sie mit den Drücken verglich, die durch das Gewicht des Deckgebirges ausgeübt werden würden. Oberflächlich betrachtet mag dies überzeugend geklungen haben, und die verwendeten Zahlen waren durchaus korrekt. Was falsch war, war die Implikation, dass Flüssigkeiten in tieferen Schichten nicht eingeschlossen werden könnten, selbst wenn sie unter einem ähnlichen Druck wie das Gestein stehen würden.

Ich erinnere mich, dies mit meinem Freund und Kollegen in Cambridge, dem Astronomen Fred Hoyle, diskutiert zu haben. Scherzhaft sagte ich: "Das ist ungefähr so albern wie die Frage eines Schuljungen, der zum ersten Mal etwas über den Atmosphärendruck lernt und fragt, warum er nicht flach wie ein Pfannkuchen gequetscht wird, wenn ein Druck von 14,7 Pfund pro Quadratzoll auf seinem Körper lastet." Wir diskutierten die Situation eines "Druckbades", in dem alles - Gestein, Flüssigkeiten und Gase - auf jeder Ebene in einen gemeinsamen Druck eingetaucht ist. Unter solchen Bedingungen gäbe es genauso viel Porosität und Permeabilität in Form von zusammenhängenden Porenräumen, die das Wandern von Fluiden ermöglichen, wie in oberflächennahen Gesteinen und Sedimenten

bei niedrigem Druck vorhanden sind. So wie der Schuljunge nicht plattgedrückt wurde, so würden auch die tiefen Poren nicht ausgequetscht werden.

Erinnern Sie sich aus Kapitel 2, dass das Leben an den Schloten der Tiefsee von winzigen Eiern bis zu reifen Muscheln und Röhrenwürmern bei Drücken wachsen muss, die 20 bis 200 Mal größer ist als der, den wir Oberflächenlebewesen erleben. Lebewesen sind dort unten genauso empfindlich wie hier oben, und dennoch stellt der hohe Druck der Tiefsee kein Problem für das biologische Wachstum dar, das man sich als die Bildung von immer mehr "Poren" in Form von Zellen vorstellen kann. Poren im Gestein, wie Zellen in lebenden Organismen, können bei sehr hohem Druck aufrechterhalten werden, solange die Flüssigkeit, die die Pore oder Zelle einnimmt, einen Druck ausübt, der genauso groß ist wie der Gegendruck der Umgebung. Es ist dieser Druckausgleich oder die Druckdifferenz, nicht der absolute Druck, der das Schicksal einer Pore bestimmt.

Dieses Argument zugunsten der Porosität der tiefen Kruste erschien erstmals in Hoyles Buch *Frontiers in Astronomy*, das 1955 veröffentlicht wurde. Hoyle hatte es als ein Kapitel mit dem Titel "*Gold's Pore Theory*" aufgeschrieben. Als ich das Thema ein Vierteljahrhundert später wieder aufgriff, hatte ich diese frühe Diskussion und Hoyles Veröffentlichung der Idee ganz vergessen, aber ich entwickelte genau dieselbe Vorstellung. Erst später fand ich das Kapitel in Hoyles Buch, das zeigte, dass ich vor langer Zeit das Gleiche gesagt hatte!

Ausgehend von der Erdoberfläche neigen Gesteine gleicher Zusammensetzung in der Tat dazu, in der Tiefe weniger porös zu werden, bis zu einem Niveau, das keine wesentlichen Verbindungen zwischen den Poren aufweist. Auf diesem Niveau wäre der Widerstand gegen den Durchfluss einer Flüssigkeit groß. Erdölgeologen extrapolierten daher aus dieser Kurve der abnehmenden Porosität die Schlussfolgerung, dass in noch größeren Tiefen noch weniger Porosität und Durchlässigkeit vorhanden sein würde. Doch genau das Gegenteil ist der Fall. An einer kritischen Tiefengrenze, an der der Fluss durch die Kompression des Gesteins stark behindert wird, erlaubt diese unvollständige, aber dennoch wirksame Barriere, dass hinter ihr ein höherer Porendruck durch von unten heraufkommende Fluide mit höherem Druck aufgebaut werden kann. In diesem etwas tieferen Bereich ist daher wieder mit einer hohen Porosität und Durchlässigkeit des Gesteins zu rechnen. Anstelle des zuvor besprochenen idealisierten "Druckbads" hat ein Gestein das eine endliche Druckfestigkeit hat, eine stufenweise Annäherung an diese: Wenn der Stauchungsdruck auf das Gestein erreicht ist, wird das Gestein in den Zustand geringer Durchlässigkeit komprimiert. (Der Stauchdruck wird durch das Überlagerungsgewicht des Gesteins abzüglich des durch die Förderhöhe des Fluids gegebenen Fluiddrucks bestimmt, der in der Regel nur etwa ein Drittel des ersteren beträgt, da die meisten Fluide etwa ein Drittel so dicht sind wie das Gestein.) In noch tieferen Schichten kann sich das gleiche Muster wiederholen, und es kann mehrere Zyklen geben, bevor das Gestein so heiß ist, dass es keine mechanische Festigkeit mehr besitzt, und sich das ideale Druckbad einstellt.

Die herkömmliche Kritik, dass Kohlenwasserstoff-Fluide in der Tiefe mangels Porenraum nicht existieren können, hält also einer Überprüfung nicht stand.

5. Kohlenwasserstoffe sickern weiterhin nach oben.

Die letzte Annahme, von der die abiogene Theorie der Erdölbildung abhängt, ist, dass für die jetzt in der Kruste vorhandenen Kohlenwasserstoffe eine Kohlenwasserstoffquelle,

aus der diese Fluide aufgestiegen sind, noch in großer Tiefe vorhanden ist. Eine Vielzahl von empirischen Beweisen an oder nahe der Oberfläche spricht in diese Richtung. In Kapitel 4 werden wir sehen, dass die chemischen Daten (Kohlenstoffisotope), die von Kritikern als stärkste Widerlegung der abiogenen Theorie dargestellt werden, tatsächlich für diese sprechen. In Kapitel 5 werde ich zeigen, wie die biochemischen Daten als konsistent mit der abiogenen Theorie angesehen werden können. In Kapitel 6 werde ich eine sehr starke Herausforderung für die biogene Theorie präsentieren, indem ich die Ergebnisse von Tiefbohrungen in einer geologischen Provinz (ausschließlich Eruptivgestein) darstelle, in der es nach der konventionellen Theorie einfach keine Kohlenwasserstoffe geben kann.

Kapitel 4

Beweise für die Theorie: „Erdöl aus der Tiefe“

Die abiogene Theorie der Erdölbildung geht davon aus, dass eine enorme Quelle ursprünglicher Kohlenwasserstoffe im oberen Erdmantel und in der unteren Erdkruste liegt - viel tiefer, als direkt gebohrt und beprobt werden kann. Folglich müssen wir nach Beweisen in den Regionen der Kruste suchen, die unsere Bohrgeräte durchdringen können. Welche empirischen Beweise in der flachen Kruste oder an der Erdoberfläche sprechen für die Theorie, dass in großer Tiefe eine wesentliche Quelle von Kohlenwasserstoffen existiert?

Die empirischen Beweise lassen sich in sieben Haupttypen unterteilen.[1] **Erstens**: Reservoirs von Erdöl, einschließlich der verschiedenen gasförmigen Formen wie Methan und Ethan, werden häufig in geographischen Mustern von langen Linien oder Bögen gefunden, die sich über Hunderte oder sogar Tausende von Kilometern erstrecken. Der inselartige Bogen von Indonesien ist vielleicht das beste Beispiel dafür. Diese linearen Muster hängen eher mit tiefliegenden und großräumigen Strukturmerkmalen der Kruste zusammen als mit dem kleinräumigen Flickenteppich der Sedimentablagerungen. Dmitry Mendelejew, der russische Chemiker, der das Periodensystem der Elemente erfand, stellte diese großräumigen Muster des Vorkommens von Kohlenwasserstoffen in den 1870er Jahren fest, und viele neue Informationen haben diesen Fall erheblich gestärkt.

Zweitens folgen die entdeckten Erdölvorkommen der so genannten Koudryavtsev Regel: Kohlenwasserstoffreiche Gebiete neigen dazu, auch in allen tieferen Schichten kohlenwasserstoffreich zu sein, die ganz unterschiedlichen geologischen Epochen entsprechen und bis hinunter zum kristallinen Grundgebirge reichen, das unter dem Sediment liegt.[2] Russlands großer Petroleumgeologe aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, N. A. Koudryavtsev, hat viele Beispiele aus der ganzen Welt angeführt, die diesen Tiefeneffekt deutlich zeigen, wie es auch viele nachfolgende russische Petroleumgeologen getan haben. Selbst dort, wo die Bohrungen an den Sedimentschichten vorbei bis in das Grundgestein vorgedrungen sind, gehen die Hinweise auf Kohlenwasserstoffe nicht aus. Die Invasion eines Gebietes durch Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten von unten könnte die vertikale Reichweite von Kohlenwasserstoffen besser erklären als die Möglichkeit der sukzessiven Ablagerung von kohlenwasserstoffproduzierenden biologischen Sedimenten in Epochen, die sich um Dutzende von Millionen Jahren unterscheiden und die keine Ähnlichkeiten in Bezug auf Klima, Vegetation oder andere relevante Merkmale aufweisen.

Drittens wird Methan an vielen Orten gefunden, an denen eine biogene Erklärung für sein Vorhandensein unwahrscheinlich ist oder an denen biologische Ablagerungen unzureichend erscheinen, um die Größe und das Ausmaß der Methanressourcen zu erklären. Zu diesen anomalen Orten gehören die großen Ozeanrisse (in denen es keine nennenswerten Sedimente gibt); Spalten in Gesteinen, die eindeutig durch eine Schmelze bei einer zu hohen Temperatur und einem zu niedrigen Druck gefroren sind, als dass vorher vorhandene Kohlenwasserstoffe oder biologische Überreste unter solch extremen Bedingungen hätten überdauern können; und Tiefen weit unterhalb von Sedimenten, die biologisches Material enthalten. (Kapitel 6 wird einen detaillierten Blick auf ein solches Vorkommen von Kohlenwasserstoffen in Schweden werfen). Darüber hinaus wurden, wie in Kapitel 2 erwähnt, riesige Mengen an Methanhydraten entdeckt, die weite Bereiche des Meeresbo-

dens bedecken. Methanhydrate sind auch in großen Mengen in Permafrostböden vorhanden.[3] Ihre weite Verbreitung deutet darauf hin, dass viele oder die meisten Regionen der Erdkruste über lange Zeiträume hinweg genügend Methan emittieren, um jeden Bereich zu sättigen, in dem dieses Eis stabil ist. Die Ausströmungsraten können jedoch regional sehr unterschiedlich sein. Die Ansicht dass die Hauptzufuhr von Kohlenstoff an die Oberfläche aus vulkanischer Emission von Kohlendioxid stammt, ist daher zweifelhaft, solange keine Schätzung der Summe der diffusen Ausströme von Methan über alle Meeres- und Landoberflächen vorgenommen wurde.

Viertens zeigen die Kohlenwasserstofflagerstätten eines großen Gebietes oft gemeinsame chemische Merkmale, unabhängig von der unterschiedlichen Zusammensetzung oder dem geologischen Alter der Formationen, in denen sie sich befinden. Solche chemischen "Signaturen" zeigen sich zum Beispiel in den Häufigkeitsverhältnissen einiger kleinerer Bestandteile, wie Spuren bestimmter Metalle, die in Erdöl enthalten sind (die häufigsten, aber keineswegs die einzigen sind Nickel und Vanadium), und in einer gemeinsamen Tendenz zur Bevorzugung einiger der verschiedenen Moleküle, aus denen Erdöl besteht. So ist es durch die chemische Analyse einer Erdölprobe oft möglich, das allgemeine Herkunftsgebiet zu identifizieren, auch wenn die Öle dieser Region aus den unterschiedlichsten geologischen Formationen stammen können.

Fünftens scheinen sich, wie viele Beobachter festgestellt haben, eine Reihe von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten wieder aufzufüllen, während sie für die kommerzielle Produktion ausgebeutet werden. Wie ich bald erklären werde, würde die abiogene Theorie diese Beobachtung erklären. Ich glaube nicht, dass die biogene Theorie das könnte - zumindest habe ich von keiner Vorhersage des Nachfüll-Phänomens gehört. Es wurde einfach beobachtet und notiert.

Sechstens: Die Verteilung der großen Mengen an Karbonat Gestein in der oberen Kruste und die Isotopenzusammensetzung der Kohlenstoffatome darin sprechen gegen die Theorie eines oberflächlichen biologischen Ursprungs der meisten der vergrabenen Kohlenwasserstoffe.

Siebtens und letztens, die klaren, gut etablierten regionalen Assoziationen von Kohlenwasserstoffen mit dem chemisch inerten gasförmigen Element Helium haben keine Erklärung in den Theorien eines biologischen Ursprungs von Erdöl. Aber wie wir sehen werden, werden diese Assoziationen erklärt, wenn die Kohlenwasserstoffe aus großer Tiefe aufgestiegen sind.

Von diesen sieben Klassen empirischer Beweise, die die abiogene Theorie der Erdölbildung begünstigen, sind die ersten vier in der Erdölbranche gut bekannt. Die soeben gegebenen kurzen Beschreibungen sind für unsere Zwecke ausreichend, und ich werde hier nicht weiter auf sie eingehen. Für die letzten drei Punkte kann ich jedoch einige Argumente anführen, die bisher nicht bekannt waren oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

Erdölreservoirs, die sich wieder auffüllen

Wenn ein neues Öl- oder Gasfeld erkundet wird, wird routinemäßig ein Druckabfall beobachtet, der aus einer bestimmten Fördermenge resultiert. Die Messung dieser Veränderung wird verwendet, um das Gesamtvolumen abzuschätzen, das für das Bohrloch zu-

gänglich ist. Weltweit zusammengefasst bestimmen diese Reservenschätzungen die Erdölexploration und in gewissem Maße auch die wirtschaftlichen Aussichten der Industrienationen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass solche Schätzungen fast immer viel niedriger sind als die tatsächliche Produktion im Laufe vieler Jahre. Derselbe Fehler in den anfänglichen Schätzungen war auch der Grund für die in den frühen 1970er Jahren weit verbreitete Annahme, dass der weltweite Vorrat an Rohöl innerhalb von fünfzehn Jahren erschöpft sein würde. Diese düstere Vorhersage beeinflusste den Preis für Erdöl - und damit die Verteilung des Wohlstands unter den Nationen.

Nach der abiogenen Theorie können Öl und Gas, wenn sie aus der Tiefe (und damit unter hohem Druck) nach oben strömen, nicht von irgendeinem Deckgestein aufgehalten werden, so kompetent dieses auch sein mag. Kein Gestein hat eine nennenswerte Zugfestigkeit, also kann kein Gestein eine Flüssigkeit zurückhalten, die mit einem größeren Druck als dem des Deckgebirges aufsteigt. Ein Deckgestein führt zu einer Konzentration der darunter befindlichen Flüssigkeiten, aber die gleichmäßige Fließgeschwindigkeit wird schließlich wieder auf einen Wert eingestellt, der der Fließgeschwindigkeit an der tiefen Quelle entspricht. Die Strömung durch ein Deckgebirge ist also wie die eines Flusses, der von einem Damm durchquert wird.

Der Damm bewirkt, dass sich auf der stromaufwärts gelegenen Seite ein See bildet, aber nachdem sich der See gefüllt hat, nimmt die Fließgeschwindigkeit wieder zu. Es fließt die gleiche Wassermenge über den Damm, die der Fluss vor dem Bau des Damms führte. Man könnte meinen, dass der aufsteigende Strom von Kohlenwasserstoffen selbst den Auffüllungsmechanismus liefern könnte, der für das Wiederauffüllen des Reservoirs verantwortlich ist. Der aufsteigende Fluss wird dies bis zu einem gewissen Grad tun. Aber wenn der Aufwärtsstrom so schnell wäre, wie die Beobachtungen der Wiederauffüllung zeigen, dann wäre die Rate, mit der Kohlenstoff in die Atmosphäre abgegeben wird, viel höher, als es die atmosphärischen Beobachtungen erlauben. Es gibt jedoch noch einen anderen Prozess, der eine viel schnellere Auffüllung bewirken kann, ohne mehr Kohlenstoff in die Atmosphäre zu treiben.

Wie bereits erwähnt, wird Gestein, das in seinen Poren eine Flüssigkeit geringerer Dichte enthält, unweigerlich ein Porendruckregime aufbauen, in dem der Flüssigkeitsdruck gestapelte Domänen definiert, die jeweils von der darunter liegenden durch eine Schicht aus zerkleinertem Gestein mit sehr geringer Porosität und Durchlässigkeit getrennt sind. Wenn Öl und Gas tatsächlich von unten aufgestiegen sind, können wir erwarten, dass sich unter dem produzierenden Feld eine vertikale Reihe von tieferen Reservoirs stapelt. Wenn nun in der obersten Domäne der Flüssigkeitsdruck durch die Öl- oder Gasproduktion gesenkt wird, dann steigt automatisch die Druckdifferenz über der zerkleinerten Schicht mit geringer Permeabilität. Der Flüssigkeitstransport durch diese Schicht wird sich daher beschleunigen. Das obere Feld wird mit einer Rate aufgefüllt, die durch die Leckage von unten gegeben ist, wenn das empfindliche Druckgleichgewicht zwischen Gestein und Flüssigkeit verändert wurde. Das obere Feld wird auf die tieferen Reserven zurückgreifen, die nicht direkt erschlossen wurden. Im Laufe der Zeit wird sich der stufenweise Druckverlauf durch die Kriechverformung im Gestein langsam an die neue Drucksituation anpassen. Mit anderen Worten: Ohne tiefer zu bohren, können wir dennoch die tieferen Reserven anzapfen, die sehr viel größer sein können als das geförderte Reservoir. Die mittlere Ausflussrate aus der tiefsten Quelle der Kohlenwasserstoffe wird sich nicht erhöht haben, sondern es wird mehr von den bereits in mittleren Tiefen vorhandenen Fluiden zugänglich geworden sein.

Das Phänomen von Erdöllagerstätten, die sich scheinbar selbst wieder auffüllen, ist weit verbreitet, vor allem im Nahen Osten und entlang der US-Golfküste.[4] Ich betrachte diese Vorkommnisse als starken Beweis für die Tiefe-Erde-Gas-Theorie.

Anhaltspunkte in den Kohlenstoffberichten

ie ober- und unterirdischen Sedimente der Erde enthalten etwa das Hundertfache des Elements Kohlenstoff, das bei der Zerkleinerung des Grundgesteins, aus dem die Sedimente entstanden sind, entstanden wäre. Die Oberfläche ist also enorm mit Kohlenstoff angereichert. Diese Anreicherung bedarf einer Erklärung.

Die Gesamtmenge des in den Sedimenten und an der Oberfläche enthaltenen Kohlenstoffs wird auf durchschnittlich etwa 200 Tonnen pro Quadratmeter Erdoberfläche geschätzt. Ein Fünftel dieses Kohlenstoffs liegt in nicht oxidierter Form vor, darunter verschiedene Kohlesorten, Erdöle, Kerogen (kohlenstoffhaltige Verbindungen, die diffus im Gestein verteilt sind) und Erdgas, entweder als freies Gas oder in Form von Methanhydrat-Eis. Hinzu kommt die dünne Schicht aus lebendem und noch nicht zersetztem biologischen Material. Diese letztere Kategorie - meiner Meinung nach die einzige nachweislich biologische Komponente - macht nur einen sehr kleinen Teil des gesamten nicht oxidierten Kohlenstoffs aus.

Die anderen vier Fünftel des Kohlenstoffs liegen in *oxidierter* Form vor, vor allem in Form von Kalkstein (Kalziumkarbonat oder $CaCO_3$) und Dolomit (eine Mischung aus Kalzium- und Magnesiumkarbonat).[5] Ein großer Teil dieses Karbonats wurde in den Ozeanen abgelagert, wobei der Kohlenstoff aus dem atmosphärisch-ozeanischen CO_2-Pool stammt. Carbonat fällt auf natürliche Weise aus der Wassersäule aus gelöstem Kohlendioxid und Calcium- oder Magnesiumoxiden aus. Es kann auch biologisch aus dem Wasser ausgefällt werden, und zwar durch Organismen, die Karbonatschalen oder -skelette bilden.

Ein Erklärungsversuch für diesen großen Überschuss an Kohlenstoff an der Oberfläche und in den Sedimenten war die Annahme, dass die Erde in den frühen Tagen der Planetenakkretion eine riesige Atmosphäre aus Kohlenstoff erhielt, die dann in Karbonatgestein umgewandelt wurde. Später würde ein Teil der Karbonate durch Subduktion entlang des Meeresbodens und an den abtauchenden Grenzen tektonischer Platten in Tiefen transportiert, in denen die Karbonate dissoziieren würden. Dabei würde Kohlendioxid freigesetzt, das durch Vulkanausbrüche wieder in die Atmosphäre gelangen würde. Eine ziemlich gleichmäßige Rate dieses Kohlenstoffflusses, der zwischen der Ablagerung als Karbonat und der Freisetzung als Kohlendioxid wechselt, wurde vorgeschlagen, um eine kontinuierliche Versorgung mit atmosphärischem Kohlendioxid über geologische Zeiträume hinweg zu erklären, zumindest über die letzten gut dokumentierten zwei Milliarden Jahre. (Frühere Zeiten bieten keine brauchbaren Daten, außer dem Hinweis, dass einige Karbonatgesteine tatsächlich vor mehr als drei Milliarden Jahren existierten.)

Nach dieser Erklärung für die oberflächennahe Anreicherung der Erde mit Kohlenstoff müsste die anfängliche Menge an Kohlendioxid in der Erdatmosphäre sehr groß gewesen sein. Die Zahl, die die erwähnte Masse an Karbonatgestein impliziert, würde eine Masse an Kohlendioxid in der frühen Atmosphäre erfordern, die achtzigmal größer ist als die gesamte heutige Atmosphäre und etwa so massiv wie die unseres Schwesterplaneten Ve-

nus. Im Gegensatz dazu beträgt der heutige Anteil an Kohlendioxid in der Erdatmosphäre nur 3,5 Volumenteile pro Zehntausend.

Es gibt jedoch gute Gründe für die Annahme, dass die frühe Erde nicht viel Material in Form von Gasen aufgenommen hat, denn Gase wie Neon, nicht-radiogenes Argon, Krypton und Xenon sind heute in der Atmosphäre nur in sehr geringer Menge vorhanden. Kein physikalischer Prozess hätte diese Edelgase aus dem Gasgemisch des Sonnensystems aussortieren können, wo sie bekanntlich wesentlich häufiger vorkommen. Und da es sich bei all diesen Edelgasen um schwere Atome handelt, hätten sie sich auch nicht der Erdanziehung entziehen und mit größerer Geschwindigkeit ins All abdriften können als andere gasförmige Elemente. Die einzige vernünftige Erklärung ist meiner Meinung nach, dass die atmosphärischen Gase hauptsächlich aus der Ausgasung von flüchtigen Stoffen stammen, die in der Tiefe aus vergrabenen festen Materialien stammen - und nicht aus einer anfänglichen großen Atmosphäre, die bei der Entstehung der Erde oder durch späteres Einfangen von Gasen aus dem Weltraum entstanden ist.

Die Theorie, dass die Erde mit einer massiven CO_2-Atmosphäre begann, scheitert noch auf eine andere Weise. Das Muster der Ablagerung von Karbonatgestein im Laufe der geologischen Zeit unterstützt diese Theorie nicht. Statt einer Verschiebung der Kohlenstoffablagerung in frühere Zeiten zeigt die Sedimentaufzeichnung eine ziemlich kontinuierliche Anhäufung solchen oxidierten Kohlenstoffs sowie nicht oxidierten Kohlenstoffs über die letzten zwei Milliarden Jahre - das ist die Zeitspanne, über die die Sedimentaufzeichnung sinnvollerweise intakt ist. In der Tat zeigt sich, dass der Gesamtkohlenstoffüberschuss in den Oberflächenschichten seit der Frühzeit deutlich zugenommen hat. Das kann nicht durch Recycling erklärt werden. Vielmehr muss eine kontinuierliche Zugabe aus Quellen, die aus dem Erdinneren aufsteigen, dafür verantwortlich gemacht werden.

Seltsamerweise stammt der größte Teil des oxidierten Kohlenstoffs in den Kohlenstoffablagerungen aus dem atmosphärisch-ozeanischen Kohlendioxid-Pool, obwohl der heutige Gehalt an Kohlenstoff in diesem Pool nur etwa einen Teil von 740 der bekannten abgelagerten Mengen ausmacht (wenn man die geschätzte Gesamtmenge an abgelagertem Kohlenstoff im Laufe von zwei Milliarden Jahren und den gemessenen CO_2-Gehalt von Atmosphäre und Ozeanen zugrunde legt). Woher kommt der Nachschub, der das atmosphärische CO_2 durch alle geologischen Epochen hindurch auf einem Niveau hält, das zur Ablagerung von Karbonaten führt, und der eine Nachschubrate aufrechterhält, die ausreichend konstant ist, um Pflanzen am Leben zu erhalten?

Wenn das Ausgasen von kohlenstoffhaltigen flüchtigen Stoffen aus den Tiefen der Erde dafür verantwortlich wäre, welche mittlere Ausströmungsrate wäre dann anzunehmen? Nach den oben dargestellten Zahlen müsste diese Ausgasungsrate im globalen Mittel ausreichen, um alle 2,7 Millionen Jahre die Menge zu ersetzen, die dem heutigen atmosphärisch-ozeanischen Gehalt an Kohlendioxid entspricht. Mit anderen Worten: Der Kohlenstoff muss in diesen Oberflächenreservoiren 740 Mal in zwei Milliarden Jahren ersetzt werden.

Wie bereits erwähnt, deutet die Chemie der Meteoriten darauf hin, dass Karbonate oder andere Formen von oxidiertem Kohlenstoff keine üblichen Bestandteile der Materialien waren, aus denen sich die festen Planeten bildeten. Der größte Teil des Kohlenstoffs lag zunächst in nicht oxidierter Form vor, hauptsächlich als Kohlenwasserstoffe. Die Beweise aus tiefen Bohrlöchern, die nicht zu nahe an aktiven Vulkanregionen liegen, zeigen in

Übereinstimmung mit den Meteoritenbeweisen, dass Kohlenwasserstoffe dort die dominierenden kohlenstoffhaltigen Fluide sind. In noch tieferen Schichten, wo der Druck so groß ist, dass Diamanten die stabile Form des Kohlenstoffs sind, dominiert offenbar wieder unoxidierter Kohlenstoff und bildet diese Kristalle aus reinem Kohlenstoff. (Kapitel 7 wird dies näher erläutern.)

Ein gewisser Anteil dieser aufsteigenden Kohlenstoff-Flüssigkeiten, die zu Beginn größtenteils in Form von CH_4 und anderen leichten Kohlenwasserstoffmolekülen vorliegen, wird während des Aufstiegs oxidiert werden. Die Sauerstoffverfügbarkeit des Gesteins, die Temperatur und der Druck entlang der Fließwege sowie die Wirkung des unterirdischen mikrobiellen Lebens bestimmen das Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid, das in einer bestimmten Region aus dem Boden aufsteigt. Jedes Methan, das die Atmosphäre erreicht, ohne unterwegs oxidiert zu werden, würde in der sauerstoffreichen Atmosphäre schnell zu Kohlendioxid oxidiert werden und sich dort dem Pool des atmosphärisch-ozeanischen CO_2 anschließen. Welcher Anteil aller aufsteigenden Kohlenstoffflüchtlinge würde als Methan und welcher Anteil als Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben werden? Das von Vulkanen stammende Kohlendioxid ist gut untersucht, während die großen Mengen an Methan, die aus nicht-vulkanischem Boden aufsteigen, meist unbemerkt bleiben. Dadurch entsteht der (oberflächliche) Eindruck, dass Kohlendioxid die Hauptquelle des Kohlenstoffüberschusses an der Oberfläche ist, und dass es auch das wichtigste kohlenstoffhaltige Gas im Boden ist.

Eine Analyse der Isotope des Kohlenstoffs offenbart jedoch einen Fehler in dieser vorherrschenden Ansicht. Die Untersuchung der Isotope des Kohlenstoffs ist ein großes und komplexes Gebiet. Ich werde hier nur einen Aspekt erwähnen, der direkt mit dem hier diskutierten Thema zu tun hat, aber selbst der ist notwendigerweise ziemlich technisch. Er muss angesprochen werden, weil es viele Debatten über seine Interpretation und Bedeutung gegeben hat. (Leser, die nicht geneigt sind, dieses Maß an Details zu absorbieren, können Seite 68 überspringen).

Natürlicher Kohlenstoff hat zwei stabile Isotope: Kohlenstoff 12 (C-12), das 6 Protonen und 6 Neutronen hat, und C-13, das 6 Protonen und 7 Neutronen hat. In den Materialien der Erde ist etwa eines von hundert Kohlenstoffatomen das schwere Isotop C-13; der Rest ist C-12. Kein chemischer Vorgang kann eines dieser stabilen Isotope in das andere umwandeln. Das Verhältnis, das man sieht, stammt von den Kernprozessen in den Sternen, die diesen Kohlenstoff zusammengesetzt haben. Alles, was auf und in der Erde passieren kann (abgesehen von Kernreaktoren), sind Selektionsprozesse - Isotopenfraktionierung -, die die Bewegung des einen oder des anderen Isotops begünstigen. Die chemischen Reaktionen der beiden Isotope sind sehr ähnlich, und es ist keine signifikante chemische Fraktionierung zu erwarten. Der wichtigste Unterschied zwischen ihnen, der eine Fraktionierung verursachen könnte, ist der Unterschied in ihren Massen, der einen Unterschied in der Geschwindigkeit ihrer thermischen Bewegung mit sich bringt. Dies führt dazu, dass sich die beiden Moleküle unter Umständen, in denen die Strömungsgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der thermischen Bewegung beeinflusst wird, wie z. B. bei der Moleküldiffusion durch ein feinporiges Material, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. In solchen Strömungen ist in vielen Fällen eine deutliche Fraktionierung zu erwarten.

Für ein leichtes Molekül wie Methan wäre die Isotopenfraktionierung ein wichtiger Effekt. Methan hat eine Molekülmasse von 16 Einheiten, wenn es aus dem leichten Isotop

des Kohlenstoffs besteht, eine Masse von 17 Einheiten, wenn es aus dem schweren besteht. Die Diffusionsgeschwindigkeit wäre für die leichten Moleküle um 3 Prozent schneller. Wenn also ein Strom von Methan über eine halbdurchlässige Membran fließen würde, könnte man erwarten, dass auf der anderen Seite dieser Membran der Anteil von leichtem Methan erhöht wäre, möglicherweise um 3 Prozent.

Wären die Kohlenstoffisotope nicht in Methan, sondern in Kohlendioxidmolekülen enthalten, würde die Isotopenfraktionierung zwar immer noch auftreten, aber sie wäre weniger ausgeprägt - nur 1 Prozent -, weil die Molekularmasseneinheiten für die beiden Kohlenstoffisotope 44 gegen 45 betragen würden. Die Anteile der beiden Kohlenstoffisotope in Kohlendioxid, das in der Luft oder im Wasser gemessen wird, sind weltweit praktisch gleich. Dies wurde so aufgefasst, dass die Flüssigkeitsreservoirs an der Erdoberfläche mit Kohlendioxid aus einer einzigen Quelle mit diesem speziellen Isotopenverhältnis versorgt werden. Dies ist jedoch keineswegs der Fall. Jedes Kohlenstoffgas, das in die Atmosphäre gelangt, wird global in einer kurzen Zeit vermischt, verglichen mit der Zeit, die es braucht, um in einem Feststoff fixiert zu werden. Es ist also nur der globale Durchschnitt der isotopischen Beiträge der beiden Kohlenstoffgase, den dieser eine Messwert darstellt. Sowohl Methan als auch CO_2 können einen Beitrag geleistet haben, mit unterschiedlichen Isotopenverhältnissen.

Um die Bedeutung der Kohlenstoff-Isotopendaten für die Tiefseegastheorie zu verstehen, müssen wir uns nun den Isotopenverhältnissen zuwenden. Alle späteren Stufen in der Nahrungskette der Oberflächenbiosphäre führen das gleiche Verhältnis von leichtem zu schwerem Kohlenstoff durch, wie es in den Photosynthesen auftritt. Pflanzen und Algen haben immer einen Mangel an C-13, verglichen mit dem Verhältnis, das in der Atmosphäre herrscht. Photosynthesen selektieren zugunsten des leichteren Isotops, C-12. Als diese Tatsache zum ersten Mal entdeckt wurde, war der Prozess, durch den das Leben die Kohlenstoffisotope fraktioniert, unbekannt. Da die Photosynthesen überall den gleichen Trick der Fraktionierung durchführten, entwickelte sich die Meinung, dass das Leben allein für den C-13-Mangel überall in der Gesteinsaufzeichnung verantwortlich sei.

Heute wissen wir, dass die Art und Weise, wie das Leben diese Isotopenfraktionierung erreicht, durch passive Diffusion geschieht, nicht durch aktive Vermittlung und Kontrolle. Das leichtere C-12 gelangt leichter durch die Poren von semipermeablen Membranen, die zur Ausstattung von Photosynthesern gehören. Daher sollte jeder Prozess, bei dem ein kohlenstoffhaltiges Molekül passiv durch eine poröse Masse diffundiert - unabhängig davon, ob es sich bei dieser Masse um eine lebende oder nicht lebende Substanz handelt - zu einer Fraktionierung führen. Könnten geologische Prozesse eine solche Fraktionierung erzeugen?

Ja. Aufsteigendes Methan würde überall dort einer Fraktionierung unterliegen, wo es durch eine feuchte Stelle im Gestein oder ein besonders enges Porennetzwerk strömt. In der Tat können sehr große Fraktionierungsfaktoren durch mehrfach gestapelte Diffusionssysteme erreicht werden, die bei der Aufwärtsreise von Kohlenwasserstoffen, die aus großer Tiefe stammen, leicht anzutreffen sind. Ein solcher ausgedehnter Prozess der Fraktionierung würde die extremen Werte der C-13-Mängel erklären, die für Kohlenwasserstoffe an einigen Stellen aufgezeichnet wurden - größere Werte, als irgendwo in Pflanzen berichtet worden sind. Nichtsdestotrotz hat sich die Interpretation, dass nur die Biologie eine signifikante Fraktionierung hervorbringen kann, so sehr durchgesetzt, dass immer dann, wenn das leichte Kohlenstoffisotop in einem unterirdischen Feststoff oder einer

Flüssigkeit bevorzugt gefunden wird, das Leben zweifelsfrei dafür verantwortlich gemacht wird.[6]

Die geochemische Analyse von Erdgasproben, die überall auf der Welt aus der Erdkruste entnommen wurden, zeigt, dass über 99 Prozent der Kohlenwasserstoffgase im leichteren Isotop des Kohlenstoffs angereichert sind, verglichen mit dem Pool der Kohlenstoffisotope, die in der Atmosphäre und den Ozeanen enthalten sind, obwohl die Streuung der Anreicherungswerte ziemlich groß ist. Diese Tatsache wurde benutzt, um die biogene Theorie der Bildung von Kohlenwasserstoffen zu unterstützen. Aber auch die abiogene Theorie würde eine befriedigende Erklärung bieten. Methanmoleküle, die das schwerere Isotop des Kohlenstoffs tragen, würden langsamer durch das Gestein aufsteigen als Moleküle, die das leichtere Isotop tragen. Die Diffusion von Pore zu Pore würde verlangsamt werden. Die längere Transitzeit würde diese schwereren Moleküle mehr Möglichkeiten zur Oxidation bieten. Die Kohlenstoffkomponente vieler dieser schweren Methan Moleküle würde somit zu Kohlendioxid oxidieren, das den Aufstieg fortsetzen würde. Kohlendioxid, das von der Erde ausgeht, ist in der Tat im Vergleich zu den Kohlenwasserstoffen mit dem schweren Isotop angereichert. Um diese Erklärung zu testen, wären jedoch weitaus genauere Daten erforderlich - nicht nur über die isotopischen Unterschiede zwischen Methan- und Kohlendioxidausgasungen, sondern auch über die relativen Mengen, die jeweils in die Atmosphäre gelangen. Hier würde das Verhältnis von Methan- zu Kohlendioxidausgasung wichtig werden.

Sowohl die biogene als auch die abiogene Theorie der Entstehung von Kohlenwasserstoffen kann also die Isotopensignatur der Kohlenwasserstoffe in der Erdkruste erklären. Ich behaupte jedoch, dass nur die abiogene Theorie die Kohlenstoff-Isotopenzusammensetzung der Karbonate, die den Hauptbestandteil des Oberflächenkohlenstoffs der Erde ausmachen, zufriedenstellend erklären kann. Um sich mit dieser Frage auseinanderzusetzen, ist zunächst ein wenig Hintergrundwissen erforderlich.

In den Geowissenschaften werden präzise Messungen kleiner Variationen des Kohlenstoff- Isotopenverhältnisses verwendet, um Rückschlüsse auf die Geschichte der in den Gesteinen gebundenen Kohlenstoffmaterialien zu ziehen. Diese Messungen werden in der Regel als Defizit (negativ) oder Überschuss (positiv) von C-13, relativ zu einem Standardkarbonatgestein, das als typisches marines Karbonat ausgewählt wurde, angegeben. Die Ergebnisse werden in der Regel als Abweichungen von diesem Standard in Teilen pro Tausend aufgetragen. Es ist auch wichtig zu wissen, dass Karbonatgestein, das in den Ozeanen abgelagert wird, ungefähr die gleiche Kohlenstoff-Isotopensignatur aufweist wie der atmosphärisch-ozeanische CO_2-Pool zum Zeitpunkt seiner Ablagerung. Bei der physikalischen Ausfällung von Karbonaten findet nur eine geringe Fraktionierung statt. Eine geringe Fraktionierung tritt auch dann auf, wenn ein Kalkstein größtenteils aus den von Lebewesen hergestellten Kalziumkarbonat-Schalen und - Skeletten aufgebaut ist. Das liegt daran, dass lebende Organismen Karbonat aus dem umgebenden Wasser für ihren eigenen Gebrauch ausfällen; sie extrudieren kein Karbonat durch Zellmembranen. Es findet also keine Diffusion statt.

Nach der biogenen Theorie würde der gesamte Bestand an Erdöl, Erdgas, Kohle und Kerogen sowie Methanhydraten eine Entnahme von Kohlenstoff aus dem atmosphärischen CO_2 darstellen. Solche Vorkommen haben sich im Laufe der geologischen Zeit vermehrt und stellen einen kontinuierlichen Prozess dar. Der von der Vegetation abgelagerte Kohlenstoff würde im Vergleich zum atmosphärischen CO_2, aus dem er vermutlich stammt,

einen Mangel an C-13 aufweisen, und eine kumulative Verschiebung zugunsten des schweren Isotops dieses atmosphärischen CO_2 wäre die Folge. Da die ozeanischen Karbonatgesteine ihren Kohlenstoff aus diesem CO_2 erhielten, sollte die Kohlenstoffaufzeichnung eine allmähliche Zunahme des C- 13-Anteils zeigen. Angesichts der für die Ablagerungen geschätzten Mengen und ihrer Isotopenverhältnisse sollte dieser Effekt groß genug sein, um in den über die geologische Zeit abgelagerten Karbonaten beobachtet zu werden.

Ein solcher Effekt ist jedoch nicht zu beobachten. Die Kohlenstoffablagerungen zeigen in der Tat eine kleine Bandbreite des Isotopenverhältnisses, das von der frühen Archäischen Zeit bis heute bemerkenswert konstant geblieben ist.[7] Die biogene Theorie kann diese Tatsache nicht erklären. Dieses Ungleichgewicht könnte durch das Recycling der nicht oxidierten Kohlenstoffablagerungen nicht behoben werden; diese würden sich größtenteils in unlöslichen und hitzebeständigen elementaren Kohlenstoff verwandeln.

Auf der Grundlage der abiogenen Theorie würden wir davon ausgehen, dass der größte Teil der nicht oxidierten Kohlenstoffablagerungen in der Kruste von aufsteigenden Kohlenwasserstoffen stammt und nicht von irgendwelchen Sedimenten aus der Atmosphäre. Unoxidierte Kohlenstoffablagerungen könnten daher keinen Einfluss auf das Isotopenverhältnis des atmosphärischen CO_2 haben. Der fraktionierte Kohlenstoff der Pflanzen würde im Zersetzungsprozess des Oberflächenlebens alle in die Atmosphäre zurückgeführt werden, so dass die Fraktionierung durch lebende Zellen keinen Einfluss auf die durchschnittliche Isotopenzusammensetzung der Atmosphäre hätte.

Die Form, in der der Kohlenstoff an die Atmosphäre abgegeben wird, oxidiert oder nicht oxidiert, hat ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Menge des in der Atmosphäre verfügbaren Sauerstoffs.[8]

Es gibt noch eine andere Klasse von Karbonaten - eine, die mit Sicherheit nicht aus atmosphärischem Kohlendioxid entstanden ist. Dies sind die rissfüllenden Karbonate, die deshalb als Zemente bezeichnet werden und in vielen Gesteinen zu finden sind. Indem sie das Gestein über einer Lagerstätte weniger durchlässig machen, können sie sogar eine wichtige Rolle bei der Rückhaltung von Kohlenwasserstoffvorkommen spielen, die groß genug für eine kommerzielle Nutzung sind.

Drei unabhängige Eigenschaften heben Karbonatzemente von den meisten marinen Karbonaten ab. Erstens sind sie rissfüllend und nicht geschichtet. Zweitens sind sie in erdölführenden Gebieten häufiger anzutreffen. Drittens zeigen sie eine viel größere Streuung des Isotopenverhältnisses als alle anderen Karbonate (Abbildungen 4.1 und 4.2).

Ich führe die große Isotopenspreizung des Kohlenstoffs in Karbonatzementen auf die Spreizung der Isotopenverhältnisse des vorgelagerten Methans zurück, von dem sich die Zemente ableiten. Man würde erwarten, dass Methan aufgrund des relativ großen Massenunterschieds zwischen seinen beiden Isotopenformen eine starke Isotopenselektion erleidet, wenn es durch Wasser oder enge Stellen im Gestein fließt. Ein Teil des aufsteigenden Methans oxidiert in den Gesteinen. Das so entstandene Kohlendioxid reagiert dann leicht mit dem in denselben Gesteinen vorhandenen Kalziumoxid und bildet Karbonat. Dieses Karbonat spiegelt die isotopische Variante wider, die das Methan eingebracht hat.

Wann immer ich die große Streuung des Isotopenverhältnisses in den Karbonatzementen diskutiere und meine Erklärung aus der Erdgastheorie anbiete, kann ich damit rechnen, mit Aussagen konfrontiert zu werden wie: "Ihnen ist nicht bewusst, dass dies auf eine Mischung aus zwei verschiedenen Methanquellen in allen von Ihnen untersuchten Regionen zurückzuführen sein muss." Aber es gibt Hunderte von Beispielen aus Kernproben von Ölbohrungen, aus Karbonatablagerungen auf dem Meeresboden, die Gasfördergebiete überlagern, und natürlich aus unseren Bohrungen in Schweden. Hätten sie alle Gase in vergleichbaren Mengen aus zwei verschiedenen Quellen gewonnen, von denen eine biogen ist? Würde es nicht viele Orte geben, an denen nur eine Quelle und keine andere dazu beigetragen hat? Wie hätte biogenes Methan seinen Weg in 500 Meter Tiefe (oder gar sechs Kilometer) in den Granit Schwedens finden können, ausgehend von einer Oberfläche, die eine Sedimentbedeckung aufwies, die kaum ausreichte, um das Grundgestein zu verbergen?

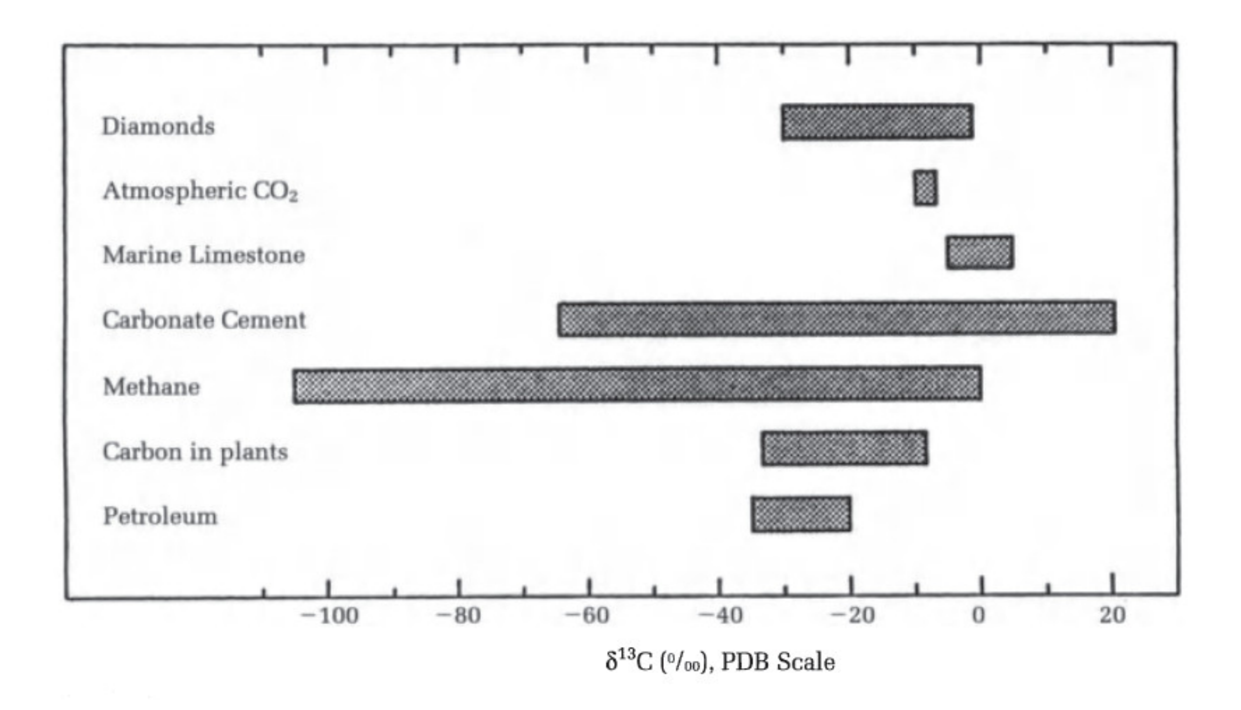


Abbildung 4.1
Die breite Verteilung der Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse in Methan aus allen natürlichen Quellen. Beachten Sie, dass die Bandbreite des atmosphärischen CO_2 gering ist, wie sie es auch sein muss, da alle unterschiedlichen Beiträge in der Atmosphäre schnell global vermischt werden. Die ozeanischen Karbonate, die ihren Kohlenstoff aus dem atmosphärischen CO_2 ableiten, zeigen einen ähnlich kleinen Bereich. QUELLE: Thomas Gold, 1987, *Power from the Earth* (ursprüngliche Zusammenstellung aus Werten, die in verschiedenen Lehrbüchern angegeben sind).

Die geologische Fraktionierung von Methan, die durch eine Differenz der Diffusionsgeschwindigkeiten ist keine abwegige Spekulation meinerseits. Ein solches Verfahren wird in großem Umfang in der Industrie eingesetzt, zum Beispiel bei der Aufbereitung von Uran für den Einsatz in Bomben oder Kernreaktoren. In industriellen Prozessen wird die Fraktionierung oft in vielen aufeinanderfolgenden Stufen eingesetzt, wodurch sehr große Fraktionierungseffekte erzielt werden können. In den weniger gut organisierten Verhält-

nissen von porösen Gesteinen finden die gleichen Fraktionierungseffekte mit geringerer Effizienz statt.

Der Transport eines Gases durch Gestein erfolgt in zwei Arten von Strömungen. Zum einen gibt es einen Volumenstrom, der durch zusammenhängende Wege fließt, die von den Gasen aus tieferen und höheren Druckebenen geschaffen und offen gehalten werden. Die Strömungsgeschwindigkeit im Hauptstrom wird von allen Gasmolekülen geteilt, unabhängig vom Isotopengehalt. Diese Strömungsgeschwindigkeit wird durch Druckgradienten und viskose Reibung im Gestein bestimmt.

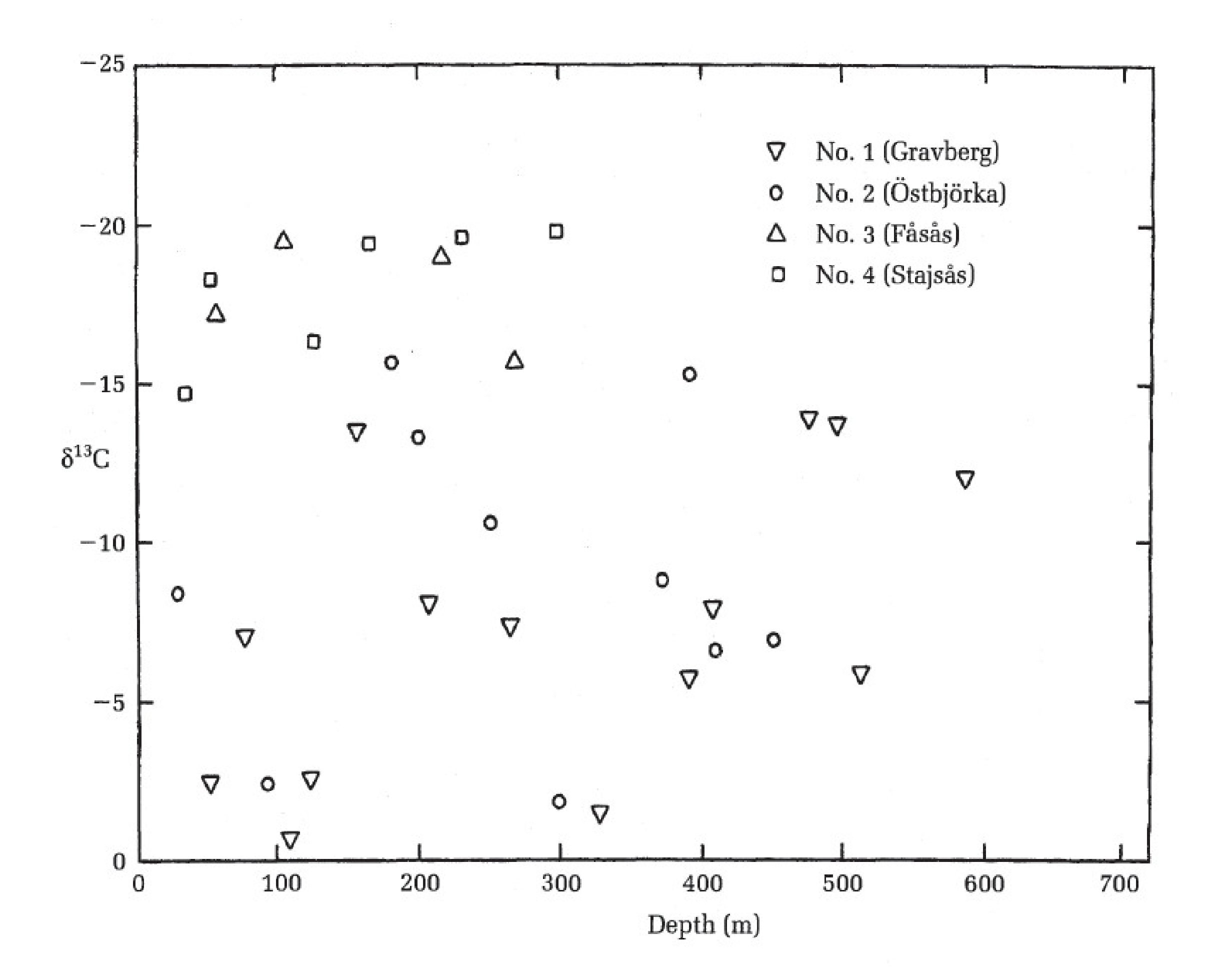


Abbildung 4.2
Die breite Verteilung der Isotopenverhältnisse in Karbonatzementen in vier flachen (weniger als 600 m tiefen) Bohrungen in der Impaktformation des Siljanringes in Mittelschweden. Beachten Sie die großen Veränderungen, die nur über Entfernungen von einigen zehn Metern zu sehen sind. Gravberg liegt im Bereich der ersten Tiefbohrung, die im Siljan Ring durchgeführt wurde. Im Gegensatz dazu würden marin geschichtete Karbonate fast alle auf der vertikalen Achse zwischen -4 und +4 liegen.

Die zweite Art der Strömung ist auf die Diffusion des Gases in eine Vielzahl von kapillaren Porenräumen zurückzuführen, die oft mit Wasser gefüllt sind. Dort wird die Geschwindigkeit durch die Einzelbewegungen der Moleküle bestimmt, und es kommt zu einer Fraktionierung. Das Methan, das aus tieferen Schichten und über lange Wege in die Atmosphäre gelangt, auf denen es unterschiedliche Mengen, aber große Werte der Frakti-

onierung erlitten hat, tritt mit allen Zeichen dieser Fraktionierung auf, sobald die atmosphärische Durchmischung es in das weltweite Reservoir mischt. Die Konstanz des atmosphärischen Verhältnisses der Kohlenstoff-Isotope überall und über die Zeit hinweg bedeutet also nicht, dass die Fraktionierung der Kohlenwasserstoffe in den einzelnen Ausströmungsgebieten nicht vorhanden war; sie bedeutet nur, dass die *Mittelwerte* für die gesamte Erde und für Zeiträume von Millionen von Jahren sehr ähnlich waren.

Der isotopische Nachweis muss in jeder Diskussion über die Karbonatgenese berücksichtigt werden. Die einzige Erklärung, die die Schlussfolgerung abwendet, dass der Anteil des schweren Isotops in marinen Kohlenstoffablagerungen im Laufe der Zeit zunehmen muss, wäre, dass die meisten Ablagerungen von nicht oxidiertem Kohlenstoff im Erdboden (Öl, Gas, Kohle und Hydrate) *nicht* aus den Trümmern photosynthetischen Oberflächenlebens stammen. Vielmehr müssen sie von nicht oxidiertem Kohlenstoff stammen, der aus der Tiefe aufgestiegen ist. Diese Erklärung wird mit der Schlussfolgerung verknüpft, dass die Ausgasung des ursprünglichen Kohlenstoffs, hauptsächlich in der reduzierten Form von Methan, in einem einigermaßen gleichmäßigen Tempo erfolgt ist. Jegliches Methan, das sich seinen Weg durch das Gestein und an die Oberfläche bahnt, würde in der Atmosphäre auf jeden Fall zu Kohlendioxid oxidiert werden, und wir könnten es nicht mehr von Gas unterscheiden, das bereits in vollständig oxidierter Form in die Atmosphäre gelangt ist.

Zusammenfassend führen die technischen Informationen und Argumente in diesem Abschnitt meiner Ansicht nach zu einer einfachen allgemeinen Schlussfolgerung: Die Volumina, das Alter und die Isotopenverhältnisse der Karbonate der Kruste stellen wichtige Beweise für die Ansicht dar, dass Kohlenwasserstoffe ursprüngliche Bestandteile der Erde waren, dass sie immer noch vorhanden sind und dass sie kontinuierlich in die äußere Kruste aufsteigen, um schließlich in der Atmosphäre aufzutauchen, zu oxidieren und sich zu vermischen.

Die Verbindung von Helium mit Kohlenwasserstoffen

s gibt eine sehr starke Assoziation von Helium mit Kohlenwasserstoffen. Diese Assoziation ist so stark, dass sich bei der kommerziellen Suche nach Kohlenwasserstoffen das Schnüffeln von Helium entlang der Oberfläche als nützlich erwiesen hat. Inzwischen gibt es sehr empfindliche Helium-Detektoren. Sie wurden zuerst zum Aufspüren von Uranvorkommen im Untergrund eingesetzt, von denen man annahm, dass sie große Heliumquellen sind. Diese Suche war nicht erfolgreich. Aber das Heliumschnüffeln erwies sich als hilfreich beim Aufspüren von Öl- und Gasfeldern.

Die Verbindung von Helium mit Kohlenwasserstoffen ist wahrscheinlich die auffälligste Tatsache, die die biogene Theorie nicht erklären kann, und deshalb ist sie für mich von größtem Interesse gewesen.

Woher kommt das Helium, und warum ist es so stark mit Kohlenwasserstoffen assoziiert? In den Gesteinen entsteht Helium hauptsächlich durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium. Es wurden regionale Muster der Heliumhäufigkeit beobachtet, in denen die vorhandenen Heliummengen weit höher sind, als die Sedimente aus der Summe ihrer radioaktiven Bestandteile jemals hätten produzieren können. In diesen Regionen der Heliumhäufigkeit tendiert die Mischung der Gase (einschließlich Kohlenwasserstoffe und Stickstoff) innerhalb der Erdkruste und aus ihr austretend zu einer bemerkenswerten Ähn-

lichkeit über sehr große geografische Gebiete, die sogar sehr unterschiedliche geologische Provinzen umfassen. Das Helium muss also mit Sicherheit von unterhalb der Sedimentgesteinsschichten gekommen sein, und es muss dort bereits in regional gut definierten Mischungsverhältnissen mit Methan und Stickstoff angekommen sein, so dass die verschiedenen Felder der Region alle mit der gleichen oder einer sehr ähnlichen Mischung gefüllt sein konnten. Nur ein Gemisch, das in das Sediment und seine einzelnen Gasfelder von unten eindrang, konnte diesen Effekt erzielen.

Eine chemische oder biologische Ursache für diese Anreicherung kann für das chemisch inerte Helium, das mit keinem Element chemische Bindungen eingeht, ausgeschlossen werden. Kein chemischer Prozess - weder biologisch noch nichtbiologisch - kann bewirken, dass Helium von einer niedrigen Konzentration auf eine höhere gebracht wird. Nur Variationen in den Konzentrationen der radioaktiven Ausgangselemente und Variationen in der Länge des Weges durch das Gestein, aus dem das Helium herausgeschwemmt wurde, könnten die großen regionalen Unterschiede in den beobachteten Heliumkonzentrationen erklären. Dort, wo die Heliumkonzentrationen von einem Ort zum anderen stark variieren, z. B. um Faktoren von hundert oder mehr, ist die Länge des Weges, durch den das Trägergas geströmt ist, wahrscheinlich die dominierende Variante gewesen.

Etwa ab 1979 begann ich mit der Arbeit an der riesigen Ansammlung von bereits vorhandenen Heliumdaten, um eine vernünftige Erklärung für die regionalen Muster zu finden. Vielleicht könnten die Daten zur Heliumanreicherung als guter Proxy für die Tiefe dienen, von der aus ihr flüssiger Kohlenwasserstoffträger die Reise nach oben antrat. Je tiefer die Quelle der Kohlenwasserstoffe liegt, desto größer ist die Gesamtlänge der Porenräume, durch die die Kohlenwasserstoffe fließen müssen, bevor sie die äußere Kruste und die Oberfläche erreichen. Und je mehr Gestein diese Flüssigkeit passieren muss, desto mehr Möglichkeiten gibt es, auf dem Weg radioaktiv abgeleitete Heliumatome zu sammeln. Die Heliumkonzentration in einem Gas kann daher als grober Hinweis auf die Tiefe verwendet werden, aus der dieses Gas gekommen ist. Diese Berechnung ist zwar grob, sollte aber dennoch ermöglichen, zwischen einer vermuteten biogenen Quelle in einer Tiefe von z. B. fünf Kilometern und einer abiogenen Quelle in 150 Kilometern zu unterscheiden. Eine so große tiefenabhängige Variante sollte die viel schwächeren Variationen, die auf Unterschiede in den Konzentrationen radioaktiver Elemente in den Gesteinen entlang des Fluchtweges zurückzuführen sind, überdecken.

Ein weiterer Anhaltspunkt für die Tiefenhypothese ist die Ausdehnung der Oberfläche, über die bestimmte Gasgemische austreten. Die Austrittsfläche kann das Verhältnis der Tiefen, in denen verschiedene Gase freigesetzt wurden, aufzeigen. Eine große geografische Ausdehnung einer identifizierbaren Mischung bedeutet, dass diese Gase aus einer sehr tiefen Ebene entstanden sein müssen. Eine andere Mischung, die einen kleineren Fleck auf der Oberfläche zeichnet, aber innerhalb des Bereichs der ersten, muss aus einer flacheren Ebene gekommen sein. Als ich und ein Kollege (Marshall Held) diese Art von Daten analysierten, die bereits für Erdölfelder in Texas und Kansas aufgezeichnet worden waren, fanden wir heraus, dass von allen flüchtigen Elementen oder Verbindungen Stickstoff in Form von N_2 und Helium häufig aus den tiefsten Ebenen stammen würde, Erdgas (Methan) aus der nächsttieferen und Öl mit verschiedenen Beimischungen von Kohlenwasserstoffgasen aus der nächsten. Aber in jedem Fall kämen alle aus Ebenen, die weit tiefer liegen als die Krustensedimente.[9]

Eine Anreicherung von Helium ist in Sedimentgestein in Abwesenheit größerer Mengen von Kohlenwasserstoffen oder Stickstoff selten zu finden. Zehn Prozent Helium in Methan- Stickstoff-Gasen ist die höchste Konzentration, die bisher beobachtet wurde. Damit sich Helium in öl- oder gasfördernden Regionen zu viel höheren Konzentrationen als in den benachbarten Gesteinen anreichert, kann nichts anderes als eine mechanische Pumpwirkung geltend gemacht werden. Für das inerte Helium ist noch eine chemische Wirkung möglich. Aber warum sollte eine Pumpwirkung Helium speziell in erdölführende Gebiete treiben? Die Assoziation ist so stark, dass die gesamte kommerzielle Heliumproduktion der Welt aus Öl- und Gasbohrungen stammt und die Heliumkonzentration in den ölführenden Gebieten oft um den Faktor 100 höher ist als im angrenzenden Boden. Selbst in den geringen Tiefen der Wasserbrunnen der Landwirte zeigen Messungen der Helium- und Methankonzentrationen einen engen Zusammenhang. Messungen dieser Art wurden an Hunderten von Messpunkten in verschiedenen Teilen der Welt durchgeführt (Abbildung 4.3). Der Zusammenhang kann nicht bezweifelt werden.[10]
Ich kann mir keine Pumpaktion vorstellen, die Helium aus umliegenden Regionen horizontal nur in Richtung eines kohlenwasserstoffreichen Gebietes treiben würde. Die einzige Aktion, die ich verstehen könnte, die Helium in die kohlenwasserstoffreichen Gebiete bringen würde, wäre, dass das diffus produzierte Helium in den Gesteinen über einen großen Tiefenintervall durch ein Gas hochgefegt wird, das selbst zu den Kohlenwasserstoffreservoiren beiträgt.

Da Helium hauptsächlich aus dem fortlaufenden radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium stammt, ist es nur sehr diffus in den Gesteinen verteilt, so dass radioaktiv erzeugtes Helium allein keinen ausreichenden Druck erzeugen könnte, um die Porenräume in den Gesteinen zu öffnen, so dass ein Massenfluss stattfinden könnte. Die molekulare Diffusion von Helium durch die Gesteine wäre der einzige Mechanismus für seinen Aufstieg. Obwohl die molekulare Diffusion von Helium schneller wäre als die jedes anderen Gases, wäre sie dennoch viel langsamer als der Massentransport. Der Heliumtransport muss daher von einem anderen und viel häufiger vorkommenden Gas angetrieben werden, das seine eigene Triebkraft sowohl für das Aufwärtsströmen als auch für die Erzeugung von druckbedingten Porenräumen und Klüften entlang des Weges bereitstellt. Es ist die treibende Kraft dieses anderen Gases, die für die erforderliche Pumpwirkung sorgt, die Helium in oberflächennahen Kohlenwasserstoff- Lagerstätten konzentriert. Wenn dieses andere Gas ein Kohlenwasserstoff ist, wird es natürlich das Helium, das es aufgenommen hat, in die Regionen pumpen, die wir in flacheren Schichten als kohlenwasserstoffhaltig identifizieren. Dies würde also die Verbindung von Kohlenwasserstoffen mit Helium erklären.

Der Test der Hypothese, dass Kohlenwasserstoff-Fluide als aufsteigender Träger von Helium dienen, wäre folgender: Wenn Helium ohne Trägerflüssigkeit fließen könnte, müsste es viele Orte geben, an denen sich Heliummengen angesammelt haben, die den Heliummengen in einigen Gasfeldern ähnlich sind; aber in Abwesenheit von Methan oder Stickstoff wären diese Ansammlungen reine Heliumfelder. Angesichts des Ausmaßes der geologischen Exploration sollten viele solcher Felder bereits entdeckt worden sein; sie wären von großem Wert. Ihr Fehlen unterstützt also das Trägergas-Konzept des Heliumtransports.

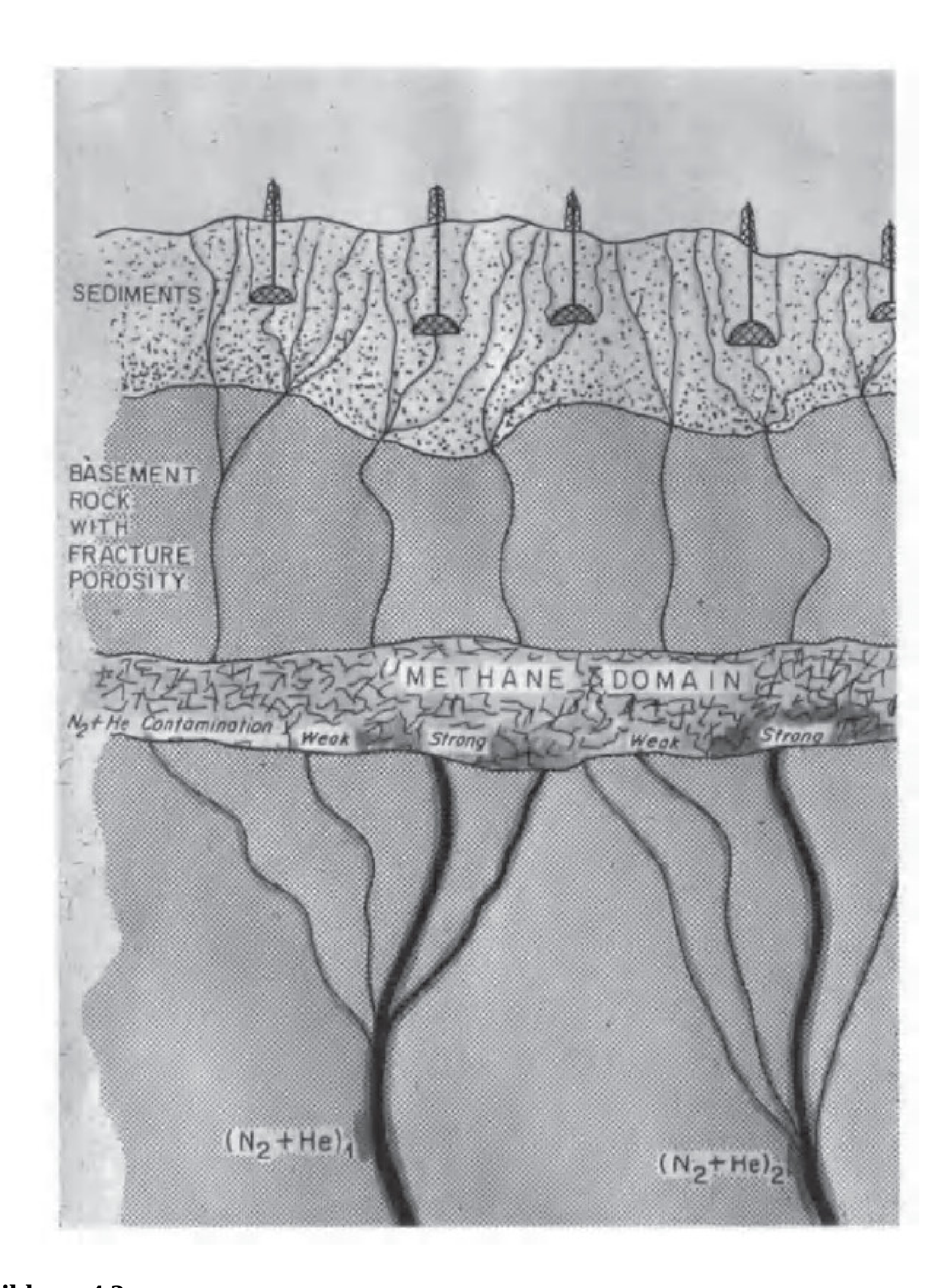


Abbildung 4.3
Heliumtransport in aufsteigenden Volatilen. Dieses Schema zeigt, wie die Theorie der tiefen Erdgase Theorie die Verbindung von Helium mit Methan erklären würde. Aus den tiefsten Ebenen (vielleicht etwa 300 Kilometer) wird das durch radioaktiven Zerfall erzeugte Helium in den Strom des aufsteigenden Stickstoffs gespült. In einer Tiefe von vielleicht 100 Kilometern, die hier als Methanbereich bezeichnet wird, vermischen sich Stickstoff und Helium mit Methan, und alle drei setzen ihre Reise nach oben fort. Diese Gase kommen dann in den Endfeldern mit bereits festgelegten Mischungsverhältnissen an. Das Stickstoff-Helium-Verhältnis ist über einen viel größeren Bereich konstant, während die Mischungsverhältnisse mit Methan einzelne kleinere Bereiche innerhalb des ersten aufweisen.

Bei dieser Untersuchung von Beweisen, die die abiogene Theorie der Erdölbildung bestätigen, haben wir Daten untersucht, die sich auf drei wichtige Merkmale beziehen, die in

der äußeren Kruste direkt beprobt oder nachgewiesen werden können: das Phänomen der Wiederauffüllung von Reservoiren, isotopische und andere Merkmale der riesigen Kohlenstoffvorräte der Kruste und die starke Assoziation von Helium mit Kohlenwasserstoffen.

Die Theorie der tiefen Erdgase wird in der Tat allein durch die Assoziation von Helium überzeugend gemacht,[9-16] die keine andere Erklärung hat. Eine Assoziation von Kohlenwasserstoffen mit spezifischem *primordialem* Helium, die an vielen Orten beobachtet wurde, bietet weitere Unterstützung.[17-27]

Aber jetzt haben wir die Schwierigkeit auf die andere Seite des Arguments verlagert: Wie konnten Kohlenwasserstoffe biologische Moleküle anziehen, wenn sie aus Tiefen aufgestiegen sind, die viel zu groß sind, um solche Moleküle zu bilden oder gar zu erhalten? Woher kamen also die Kohlenwasserstoffe? Wenn sie in großer Tiefe (und dann notwendigerweise bei hoher Temperatur) entstanden sind, können wir verstehen, warum sie viel Helium anzogen. Wenn sie im flacheren Sedimentbereich entstanden sind, würden wir das Vorhandensein von biologischen Molekülen verstehen. Wir scheinen hier ein Paradoxon zu haben: Zwei Arten von perfekt gesicherten Informationen, aber mit Erklärungen für sie, die sich gegenseitig widersprechen. Die Auflösung dieses scheinbaren Paradoxons ist das Thema des nächsten Kapitels.

Kapitel 5

Die Lösung des Erdöl-Paradoxon

Die vorherrschende Theorie unter westlichen Wissenschaftlern ist, dass Erdöl aus den vergrabenen und chemisch umgewandelten Überresten von einst lebenden Zellen stammt. Wenn ich behaupte, dass komplexe Kohlenwasserstoffe ursprüngliche Bestandteile der Trümmer des Sonnensystems waren, aus denen sich die Planeten gebildet haben, und dass diese Kohlenwasserstoffe auch heute noch in der Erdkruste und im oberen Erdmantel in einem nicht oxidierten Zustand vorliegen, so ist das eine radikal gegensätzliche Sicht der Erdölbildung. Aber das Problem bleibt: Wenn die komplexen Kohlenwasserstoffe, die in der Erdkruste gefunden werden, nicht die überarbeiteten Überreste des Lebens an der Oberfläche sind, warum enthält dann das Erdöl die Signatur des Lebens?

Befürworter der biogenen Theorie der Erdölbildung stützen sich auf vier zentrale Beobachtungen.[1] **Erstens** enthält alles natürliche Erdöl Beimischungen von Molekülgruppen, die eindeutig als Abbauprodukte komplexer, aber häufig vorkommender organischer Moleküle identifiziert werden können, die vom Leben synthetisiert wurden. Diese Moleküle, die in Erdöllagerstätten auf der ganzen Welt vorhanden zu sein scheinen, können nicht in einem nicht-biologischen Prozess aufgebaut worden sein.

Zweitens weist Erdöl häufig eine optische Eigenschaft auf, die auf eine biologische Aktivität schließen lässt. Wenn planpolarisiertes Licht durch eine Probe der Flüssigkeit geleitet wird, tritt das Licht mit gedrehter Polarisationsebene auf. Diese Drehung impliziert, dass Moleküle, die sich entweder mit rechts- oder linkshändiger Symmetrie ausbilden können (in demselben Sinne, wie wir rechts- und linkshändige Schrauben kennen), nicht in (statistisch) gleicher Anzahl im Petroleum vertreten sind. Vielmehr dominiert eine "Hand" - was für biologische Flüssigkeiten charakteristisch ist, vermutlich weil ihre Moleküle eine gemeinsame Abstammung haben, aber diese Eigenschaft fehlt in Flüssigkeiten nicht-biologischen Ursprungs.

Drittens sind einige Petroleums Mischungen von Kohlenwasserstoffmolekülen, in denen solche mit einer ungeraden Anzahl von Kohlenstoffatomen häufiger vorkommen als solche mit einer geraden Anzahl. Auch der umgekehrte Fall ist zu finden. Es wurde vorgeschlagen, dass ein solcher ungerader-gerader Effekt so verstanden werden kann, dass er durch den Zerfall bestimmter Klassen von Molekülen entsteht, die in biologischen Substanzen häufig vorkommen und zu einer bestimmten Probe beigetragen haben könnten. Wie im Fall des optischen Effekts wurde auch hier keine detaillierte Erklärung geliefert. Die Biologie kann durchaus beteiligt sein, aber nicht unbedingt als Quelle dieser Moleküle.

Viertens: Erdöl findet sich meist in Sedimentablagerungen und nur selten in den Primärgesteinen der darunter liegenden Kruste. Selbst unter den Sedimenten bevorzugt das Erdöl Schichten, die geologisch jung sind. In vielen Fällen scheinen solche Sedimente reich an teerartigen Molekülen zu sein, die als Kerogen bezeichnet werden. Diese Moleküle werden von Befürwortern der biogenen Sichtweise als biologischen Ursprungs interpretiert und gelten als Ausgangsmaterial für die in der Nähe gefundenen Erdölvorkommen. Es wird angenommen, dass Erdprozesse diese diffus verteilten Kerogenmoleküle in flüssiges Erdöl umwandeln. Es wird auch angenommen, dass Erdprozesse das Erdöl irgendwie in

konzentrierte Reservoirs innerhalb von porösem Sedimentgestein leiten, manchmal konzentriert um den Faktor 100 relativ zur Verteilung des Kerogens und in beträchtlichen seitlichen Abständen von dem kerogenreichen Gestein, das als Quelle angesehen wird. Eine Theorie für diesen Konzentrationsprozess wurde noch nicht vorgeschlagen.

Die Lösung für die heiße Biosphäre in der Tiefe

Ich verbrachte Jahre damit, über die widersprüchlichen Beweise für die Bildung von Erdöl zu rätseln. Aus Gründen, die in den beiden vorangegangenen Kapiteln erläutert wurden, stellte sich die Frage, wie die abiogene Theorie mit den ebenso starken Beweisen für biologische Aktivität in Einklang gebracht werden konnte. Wie sich herausstellte, war das Problem nur deshalb zu einem Paradoxon geworden, weil die Argumente auf beiden Seiten eine unerkannte versteckte Annahme enthielten.

In der Wissenschaft gibt es keine wirklichen Paradoxien; die scheinbaren Paradoxien sind lediglich die höfliche Art der Natur, uns *sotto voce* mitzuteilen, dass unser Verständnis unvollständig oder fehlerhaft ist. In Bezug auf das Erdöl-Paradoxon war die unerkannte Annahme auf beiden Seiten der Debatte der unhinterfragte Glaube, dass Leben nur an der *Oberfläche der Erde* existieren kann. Keiner von uns hatte in Betracht gezogen, dass eine große Menge an aktiver Mikrobiologie *innerhalb der Erdkruste* existieren könnte, bis hinunter zu den tiefsten Schichten, zu denen wir bohren können.

Diese Annahme ist ein Überbleibsel dessen, was ich als Oberflächenchauvinismus bezeichnet habe, der Glaube, dass Leben nur ein Oberflächenphänomen ist. Wenn wir diese Annahme aufgeben können, können wir die Behauptung aufstellen, dass die biologischen Moleküle im Rohöl keine Überbleibsel eines lebenslangen Oberflächenlebens sind, das tot, begraben und teilweise umgewandelt wurde. Vielmehr sind sie der Beweis für eine blühende Gemeinschaft von Mikroben, die ihr Leben in der Tiefe fristen und sich an Kohlenwasserstoffen eines tiefen, abiogenen Ursprungs laben. Wenn wir uns erst einmal von den Vorurteilen befreit haben, können wir unsere Augen für die Existenz einer tiefen Heißbiosphäre öffnen - und eine solche wäre von immenser Größe, um alle biologischen Moleküle in Ölen rund um den Globus zu erklären.

Für einige Zeit, bevor ich erkannte, dass die Theorie, dass die Theorie der tiefen heißen Biosphäre das Erdöl-Paradoxon auflösen könnte, hatte ich eine Zeit lang betont, dass Öle, die sich durch die Sedimente nach oben bewegen, alle biologischen Materialien auslaugen, auf die sie unterwegs stoßen, und dass eine solche Auslaugung diese Flüssigkeiten mit Biomolekülen versorgen würde.[2] Es war jedoch schwierig, diesen Prozess mit der Tatsache in Einklang zu bringen, dass einige Erdöllagerstätten keine plausible Verbindung zu Sedimentschichten haben, in denen biologische Materialien begraben sein könnten und daher der Auslaugung unterliegen. Zu diesen problematischen Ölen gehören die Öle aus den sehr tief liegenden Gesteinen, in denen Proben von Ölen gefunden wurden. Die Lösung musste ein abiogener Ursprung allen Erdöls und Erdgases sein, verbunden mit der außergewöhnlichen These, dass eine riesige mikrobielle Biosphäre in der Tiefe existierte, bis hinunter zu mindestens acht Kilometern (das ist die Tiefe, in der Erdöl in den tiefsten Bohrlöchern gefunden wurde). Nach dieser Ansicht hätte alles Erdöl, das aus dem Boden entnommen wurde, ein aktives mikrobielles Leben unterstützt, da Öl eine sehr begehrte Substanz für verschiedene Formen der Mikrobiologie ist. Wir sehen deutlich, dass dort, wo die Temperatur des Öls niedrig genug ist, damit Mikroben gedeihen können, die biologischen Marker vorhanden sind.

Die Kopplung der Theorie der abiogenen oder tiefen Erdgase mit der Annahme, dass eine tiefe, heiße Biosphäre existiert, erlaubte es mir, die Petroleum-Helium-Assoziation so zu interpretieren, dass sie von den langen Wegen herrührt, die die Petroleumflüssigkeiten von ihren tiefen Ursprüngen bis zur äußeren Kruste zurückgelegt haben. Da Petroleum weit unterhalb der Tiefengrenze für jegliche Biologie entstanden ist, die es mit den Biomolekülen, die wir jetzt darin beobachten, hätte anreichern können, muss es nach oben gereist sein, ohne diese Moleküle zu besitzen. Beim Erreichen flacherer Schichten, in denen die Bedingungen das Funktionieren der Biologie erlaubten, wurde das aufsteigende Erdöl schnell mit der großen Vielfalt an molekularen Spezies beladen, die eine lebhafte Mikrobiologie in solchen Schichten produzieren konnte.

Unbestreitbare Beweise für lebende einheimische Mikroben wurden in Ölbohrungen in Tiefen von mehr als vier Kilometern gemeldet, wie wir in Kapitel 2 gesehen haben. Ich glaube, dass alle Tiefen, in die wir mit unseren Bohrern vordringen können und aus denen wir daher Proben für die Analyse erhalten, flacher sind als die Übergangsebene, unterhalb derer die Biologie nicht arbeiten kann. Daher werden alle Kohlenwasserstoffe diese Art der biologischen Anreicherung zeigen, aber aus einem ganz anderen Grund als dem, der von der biogenen Theorie angenommen wird. Lebende Zellen, nicht nur biologisch abgeleitete Moleküle, wurden bereits aus tiefen Bohrlöchern hochgezogen und erfolgreich kultiviert. Die tiefe heiße Biosphäre hat eine gewaltige Ausdehnung, auch wenn sie auf Porenräume und Klüfte im Gestein beschränkt ist.

Biologische Moleküle in nicht-biologischem Erdöl

Die Theorie der tiefen heißen Biosphäre setzte also voraus, dass wir die Existenz eines bisher unerkannten und riesigen Lebensbereichs anerkennen. Diese Annahme würde das Petroleum- Paradoxon auflösen, aber es war eine sehr große Annahme, die man machen musste. Bevor sie akzeptiert werden konnte, musste sie durch Beweise untermauert werden. Diese Beweise tauchten 1984 in Form einer bemerkenswerten Arbeit von Guy Ourisson, Pierre Albrecht und Michel Rohmer auf, die an der Universität Straßburg arbeiteten.[3] Obwohl ich mit der Hauptschlussfolgerung der Autoren, dass Bakterien das Öl und die Kohle *produziert* hatten, nicht einverstanden war (mit welcher Nahrung? Mit welchen Kohlenstoff- und Wasserstoffquellen?), stärkten die Mengen an mikrobiellem Material, über die sie berichteten, meine Bereitschaft, die außergewöhnliche Annahme einer reichen Biosphäre in erheblicher Tiefe zu machen.

Die Autoren zeigten, dass die Menge an biologischen Ablagerungen im Erdöl erstaunlich groß war, obwohl die Anteile im Erdöl gering waren. Eine massive bakterielle Verunreinigung wurde auf jeden Fall unterstellt, obwohl dies nicht die Meinung dieser Autoren war. Das Ourisson- Team vertrat vielmehr die konventionelle Ansicht, dass die Biologie für die Produktion von Kohlenwasserstoffen unerlässlich sei. Sie zogen nicht in Betracht, dass die Öle Nahrung für ein produktives mikrobielles Leben sein könnten und damit die Verbindung zwischen Erdöl und Biologie herstellen. Ich antwortete in einem Brief, der im November 1984 in der gleichen Zeitschrift veröffentlicht wurde, und schrieb unter anderem,

> Eine weit verbreitete frühe bakterielle Flora könnte entstanden sein, als die Kohlenwasserstoffausgasung der Erde eine Quelle chemischer Energie in den Oberflächenschichten der Kruste bot, wo Sauerstoff durch die Photodissoziation von

> Wasser und den Verlust des Wasserstoffs ins All reichlich vorhanden war. Methan-oxidierende Bakterien (und möglicherweise auch Oxidierer von Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff) konnten in den Gesteinen der Kruste gedeihen. Im Laufe der Evolution könnte die Photosynthese mit all ihrer Komplexität als Energiequelle der Kohlenwasserstoffausgasung vorausgegangen sein. Die Flora, die die Ausgasung aufrechterhielt, gab Öl und Kohle ihren unverwechselbaren biologischen Stempel auf.[4]

Eine molekulare Signatur des Lebens in Ölen kam von einer Gruppe von Molekülen, die das Ourisson-Team gefunden und *Hopanoide* genannt hatte. Hopanoide sind leicht sauerstoffhaltige und angereicherte Versionen der Kohlenwasserstoffmoleküle, die als Hopane bekannt sind und etwa 27 bis 36 Kohlenstoffatome enthalten, die in zusammenhängenden Ringen in einem einzigen Molekül angeordnet sind. Die kohlenstoffreicheren Hopanoide enthalten die zusätzlichen Kohlenstoffbestandteile als Kette, die an die verbundenen Ringe angehängt ist. Hopanoide sind in allen der zahlreichen Erdölproben, die auf sie untersucht wurden, auffällig. Dabei handelt es sich um Proben, die aus Sedimenten unterschiedlichster Altersstufen und aus der ganzen Welt stammen. Und es ist unbestritten, dass diese Moleküle aus den Membranen von einst lebenden Zellen stammen.

Die Menge der Hopanoide sei riesig, so die Autoren: "Der globale Bestand an Hopanoiden allein würde mindestens 10^{13} oder 10^{14} Tonnen betragen, mehr als die geschätzten 10^{12} Tonnen organischen Kohlenstoffs in allen lebenden Organismen."

Ourisson und Kollegen waren jedoch verwundert über die Tatsache, dass, während lebende Bäume, Farne und Algen bekanntermaßen Hopanoide am unteren Ende des Kohlenstoffzahlenspektrums enthalten, nur Bakterien[5] die kohlenstoffreicheren Moleküle, wie C_{35} und C_{36}, aufweisen. Ein weiteres interessantes Molekül (ein Terpenoid), das das Ourisson-Team in Kohlenwasserstoffen gefunden hat, ist auch in Bakterien vorhanden, die bekanntermaßen von der Oxidation von Methan leben. Die biogenen Moleküle, die weltweit in natürlichen Kohlenwasserstoffen entdeckt wurden, können alle mit Bestandteilen von Bakterien oder Archaeen in Verbindung gebracht werden, und keines ist ausschließlich mit der Makroflora oder -fauna verbunden. Es gibt also in diesen Beobachtungen keinen Hinweis darauf, dass etwas anderes als eine erhebliche mikrobiologische Verunreinigung der Öle erforderlich ist, um alle beobachteten Moleküle zu erklären. Und das bedeutet wiederum, dass es keine Beweise dafür gibt, dass irgendwelches Oberflächenleben herangezogen werden muss, um das Vorhandensein dieser biologischen Moleküle in unterirdischen Kohlenwasserstoffen zu erklären.

Man hätte jedoch nicht auf die Hopanoide warten müssen, um die biogene Theorie der Erdölbildung in Frage zu stellen. Robert Robinson lieferte das überzeugendste Argument mehr als ein Jahrzehnt, bevor die Erdölgeologie meine Aufmerksamkeit beanspruchte. "Es kann nicht stark genug betont werden", schrieb er 1963, "dass Erdöl nicht das Bild der Zusammensetzung zeigt, das man von modifizierten biogenen Produkten erwartet, und alle Argumente aus den Bestandteilen alter Öle passen genauso gut oder besser zu der Vorstellung eines primordialen Kohlenwasserstoffgemisches, dem Bioprodukte hinzugefügt wurden."[6]

Ganz einfach: Es ist höchst unwahrscheinlich, dass irgendwelche biologischen Abfälle zu wasserstoffgesättigten Kohlenwasserstoffen abgebaut werden könnten. Robinsons Ar-

gumentation hat nach wie vor Bestand und bleibt vielleicht das am leichtesten zu verstehende und überzeugendste aller biochemischen Argumente gegen die biogene Theorie.

Niemand hat bisher im Labor Erdöl oder Kohle aus einem Becher mit Algen oder Farnen synthetisiert. Eine einfache Heuristik wird zeigen, warum eine solche Synthese extrem unwahrscheinlich wäre. Erinnern wir uns zunächst daran, dass Kohlenhydrate, Proteine und andere Biomoleküle hydratisierte Kohlenstoffketten sind. Diese Biomoleküle sind im Grunde genommen Kohlenwasserstoffe, in denen Sauerstoffatome (und manchmal auch andere Elemente, wie Stickstoff) durch ein oder zwei Wasserstoffatome ersetzt worden sind. Biologische Moleküle sind daher nicht mit Wasserstoff gesättigt. Es ist ziemlich unwahrscheinlich, dass in der Erde vergrabene biologische Trümmer Sauerstoffatome verlieren und an deren Stelle Wasserstoffatome aufnehmen. Wenn überhaupt, sollte ein langsamer chemischer Prozess in geologischen Umgebungen zu einem weiteren Sauerstoffgewinn und damit zu einem weiteren Wasserstoff*verlust* führen. Und doch ist ein Wasserstoff-"Gewinn" genau das, was wir in Rohölen und ihren flüchtigen Kohlenwasserstoffen sehen. Das Kohlenwasserstoff-Kohlenstoff- Verhältnis ist in diesen Materialien wesentlich höher als in nicht abgebauten biologischen Molekülen. Wie also könnten biologische Moleküle irgendwie Wasserstoffatome *erwerben*, während sie vermutlich zu Erdöl abgebaut werden?

Bedenken Sie auch, dass in Ölbohrungen das durchschnittliche Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis mit der Tiefe zunimmt, was (nach der abiogenen Sichtweise) einem Wasserstoffverlust im Laufe der Zeit und während der Aufwärtswanderung der Flüssigkeiten entspricht. Dennoch würde ein tieferes Wasserstoff-Reservoir als "älter" angesehen werden als ein flacheres Reservoir in der gleichen Umgebung, wenn man das Prinzip der Überlagerung in der Geologie berücksichtigt - dass jüngere Sedimente auf älteren Sedimenten abgelagert werden. Warum sollten dann die tiefsten Ablagerungen das höchste Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff haben?

Ausgestattet mit der Theorie der tiefen heißen Biosphäre als Lösung des Erdölparadoxons habe ich eine Abschätzung (veröffentlicht 1992) der Biomasse vorgenommen, die eine solche Biosphäre tragen könnte.[7] Beginnen wir mit einer angenommenen oberen Temperaturgrenze für Leben von 110°C bis 150°C (was in beträchtlicher Tiefe immer noch weit unter dem Siedepunkt von Wasser liegen würde). Damit läge die Tiefengrenze für tiefes biosphärisches Leben in den meisten Bereichen der Kruste irgendwo zwischen 5 und 10 Kilometern unter der Oberfläche. Der gesamte Porenraum, der in den Landgebieten der Erde bis zu einer Tiefe von 5 Kilometern zur Verfügung steht, kann auf 2×10^{22} Kubikzentimeter geschätzt werden (wenn man 3 Prozent Porosität als Durchschnittswert annimmt). Wenn Material mit der Dichte von Wasser diese Porenräume ausfüllt, würde dies einer Masse von $2 X 10^{16}$ Tonnen entsprechen. Welcher Bruchteil davon könnte bakterielle Masse sein?

Hier wird die Berechnung höchst spekulativ. Schätzen wir, eher konservativ, dass die Bakterienmasse nur 1 Prozent oder 2×10^{14} Tonnen des gesamten Materials in den Porenräumen ausmacht. In diesem Fall entspräche die Biomasse, die in der tiefen heißen Biosphäre entsteht und enthalten ist, einer Schicht lebenden Materials, die etwa 1,5 Meter dick wäre, wenn sie über die gesamte Landoberfläche verteilt wäre. Das wäre in der Tat etwas mehr als die existierende Flora und Fauna der Oberflächenbiosphäre, und es stimmt mit der weltweiten Schätzung der biologischen Trümmer - Hopanoide - überein, die das Ourisson- Team für alle Rohöle errechnet hat.

Natürlich wissen wir zur Zeit nicht, wie wir eine realistische Schätzung der unterirdischen Masse des jetzt lebenden Materials vornehmen können. Aber meine grobe Schätzung und die von Ourisson und Kollegen deuten darauf hin, dass sie durchaus mit der gesamten lebenden Masse der Oberflächenbiosphäre übereinstimmen oder sie sogar übertreffen könnte.[8]

Die Theorie: Kohleentstehung aus aufquellendem Gas.

Die vorherrschende Ansicht in den westlichen Ländern ist, dass Erdöl und Erdgas aus biologischen Trümmern stammen, die durch geologische Prozesse aufgearbeitet wurden, wie wir gesehen haben. Im Gegensatz dazu ist die abiogene Sichtweise, gekoppelt mit der Theorie der tiefen heißen Biosphäre, dass flüssiges Erdöl und seine flüchtigen Bestandteile nicht Biologie sind, die von der Geologie umgearbeitet wurde, sondern Geologie, die von der *Biologie umgearbeitet wurde.*

Der Beweis, den wir jetzt für biologische Aktivität im Erdöl haben, sind die zellulären Überreste von Mikroben, die sich von Kohlenwasserstoffen ernährt haben, einige in einer Tiefe von vielleicht zehn Kilometern, wo man früher dachte, dass keine Biologie vorhanden sein könnte. Diese mikrobielle Aktivität ist nicht nur etwas, das in der fernen Vergangenheit passiert ist; sie ist immer noch im Gange. Öl- und Gasreservoirs füllen sich immer noch und treten immer noch an die Oberfläche, und die Bewohner der tiefen, heißen Biosphäre bauen immer noch frische Ölvorräte zu Kohlendioxid und anderen Ausscheidungsprodukten ab, während sie leben, sich vermehren und sterben. Die abiogene Theorie erklärt gut viele räumliche und chemische Merkmale dieser Kohlenwasserstoffreserven, die die biogene Theorie nicht erklären konnte.

Und die biologischen Moleküle, die in Rohölen nachgewiesen wurden, werden durch die tiefe heiße Biosphäre erklärt. Erdöl und Erdgas sind also keineswegs "fossile Brennstoffe", wie sie oft bezeichnet werden. Aber für Kohle muss ich doch eine Ausnahme machen, könnte man meinen.

Nein. Ich behaupte, dass Torf und Braunkohle zwar aus unzersetzten biologischen Ablagerungen stammen, nicht aber Steinkohle. Meiner Ansicht nach entsteht Steinkohle aus dem gleichen Aufwuchs von Kohlenwasserstoffen in der Tiefe, die sich als Erdöl und Erdgas ansammeln. Bei Kohle, wurde jedoch die Wasserstoffkomponente weiter verdrängt, so dass ein stark kohlenstoffangereicherter, wasserstoffarmer Kohlenwasserstoff zurückbleibt. Wie konnte sich Kohle auf diese Weise bilden? Welche empirischen Belege gibt es für diese Behauptung im Gegensatz zur biogenen Theorie?

Viele Menschen denken, dass der Ursprung der Kohle vollständig geklärt ist. Dies ist aber nicht der Fall. Es ist das passiert, was in der Wissenschaft nur zu oft passiert: Eine unbefriedigende Erklärung wird akzeptiert, weil über einen langen Zeitraum keine befriedigendere Erklärung auftaucht. Die biogene Theorie der Kohleentstehung verlangt die - meines Erachtens unberechtigte - Annahme, dass es früher rund um den Globus ausgedehnte Sumpfwälder gab, in denen Generation um Generation von Baumfarnen (im Paläozoikum) und Koniferen (im Mesozoikum) in sauerstoffarmes Wasser fielen und so die Zersetzung verhinderten. Außerdem befanden sich diese "Kohlesümpfe" in Regionen, in denen Tausende von Metern Abraum, manchmal im Wechsel mit Sumpfbedingungen, im Laufe der Äonen auf die begrabenen Pflanzen drückten. Die in der Tiefe herrschenden

Drücke und Temperaturen verwandelten dann, wenn genügend Zeit vorhanden war, biologische Moleküle irgendwie in Steinkohle.

Frühe Erforscher der Steinkohle (beginnend z. B. in England bereits in den 1850er Jahren) fanden vieles, was sie nicht über die Zusammensetzung der Substanz erklären konnten. Da sich in der Kohle einige Fossilien befanden und das Leben auf der Erde auf Kohlenstoff basiert, schien eine biogene Theorie recht plausibel und in Ermangelung einer Alternative der beste Weg zu sein. Dennoch war die biogene Theorie nicht in der Lage, die meisten oder alle Situationen, in denen Kohle gefunden wird, zufriedenstellend zu erklären.

Es ist in der Tat wahr, dass Kohle manchmal - wenn auch keineswegs immer - einige Fossilien enthält, aber diese Fossilien selbst schaffen ein Problem für die biogene Theorie. Erstens, warum hat das eine oder andere Fossil seine Struktur mit Perfektion beibehalten, manchmal bis auf die Zellebene, während andere, vermutlich viel größere Mengen solcher Trümmer daneben so vollständig zerstört wurden, dass überhaupt keine Struktur zu erkennen ist? Wäre es nicht seltsam, wenn die Form eines Blattes oder Zweiges perfekt erhalten bliebe und alle anderen Blätter und Zweige in der gleichen Ansammlung (durch hohen Druck) in eine einheitliche Masse aus fast reinem Kohlenstoff verwandelt würden? Zweitens sind Fossilien manchmal fast vollständig mit Kohlenstoff gefüllt, ohne verformt zu sein. Jede Zelle der Pflanze scheint mit dem gleichen kohligen Material gefüllt gewesen zu sein, das den Großteil der Kohle außerhalb des Fossils bildet. Wie gelangte das kohlehaltige Material in die Struktur des Fossils, ohne es zu zerstören? Solche Kohlefossilien scheinen mit Kohlenstoff gefüllt zu sein, so wie versteinertes Holz mit Kieselsäure gefüllt ist.

Es wird allgemein angenommen, dass kieselsäurereiches versteinertes Holz durch das Durchströmen von wässrigen Flüssigkeiten, die reich an gelöstem Siliziumdioxid sind, eingebracht wurde. Mit der Zeit lagert sich Siliziumdioxid - Quarz - ab und kristallisiert so, dass die Zellstrukturen erhalten bleiben, ohne dass der Zellinhalt erhalten bleibt. Warum sollte bei der Entstehung der Kohle und ihrer fossilen Einschlüsse nicht der gleiche Prozess mit einer ganz anderen Flüssigkeit am Werk gewesen sein? Die "Kohle" in den Zellen der Pflanze muss als Flüssigkeit eingedrungen sein, und vermutlich war es dieselbe Flüssigkeit, die die umgebende Kohlematrix abgelagert hat.

Wenn nicht nur Erdöl und Erdgas ein Geschenk der tiefen Kruste oder des Mantels sind, sondern auch die Kohle, wie könnte sich dann eigentlich Kohle bilden?

Zunächst einmal sagen uns einfache Chemie und Physik, dass Kohlenwasserstoffe auf ihrem Weg nach oben durch die Kruste einen Verlust an Wasserstoff erleiden. Warum ist das so? Erstens, jede Gelegenheit für ein verirrtes (oder mikrobiell katalysiertes) Sauerstoffatom, mit einer Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit jeglicher Art zu interagieren, führt dazu, dass diese Flüssigkeit zwei Wasserstoffatome für jedes Sauerstoffatom, das ihr begegnet, verliert, wodurch Wasser erzeugt. Dies stellt nichts anderes als ein Streben nach chemischem Gleichgewicht dar. Das Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis der Flüssigkeit steigt dann an, wobei andere entsprechend geladene Atome (wie Stickstoff und Schwefel) den Platz des Wasserstoffs in der Molekülstruktur einnehmen oder, was noch häufiger vorkommt, Doppelbindungen die Einfachbindungen in den Kohlenstoffketten oder -ringen ersetzen, die den Wasserstoffverlust ausgleichen müssen.

Wie wir nur zu gut von den Fehlern in den Motoren unserer Autos wissen, ziehen Sauerstoffatome bevorzugt fast alle Wasserstoffatome in einer Kohlenwasserstoffflüssigkeit ab, bevor sie sich an die schwieriger zu oxidierenden Kohlenstoffatome machen. Das Ergebnis: weniger als vollständig oxidierter Kohlenstoff (Kohlenmonoxid, CO). Ein Zeichen für noch weniger Effizienz ist das nicht oxidierte schwarze Zeug, das am Kopf einer Zündkerze aus dem Motor eines schlecht getunten Autos oder aus dem Auspuffrohr eines schwer beladenen Lastwagens, der den Gang wechselt, herausquillt. Dabei handelt es sich um fast reinen Kohlenstoff, oder Ruß.

Im Allgemeinen gilt: Je "schwerer" (kohlenstoffreicher) der Kraftstoff ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer unvollständigen Verbrennung. Um den gesamten Kohlenstoff sowie den Wasserstoff in einer Kohlenwasserstoffflüssigkeit in Moleküle der höchsten Oxidationsstufe umzuwandeln, müssen genügend Sauerstoff und ausreichend hohe Temperaturen vorhanden sein. Eine Paraffin-Kerzenflamme zum Beispiel ist heiß genug, um den Wasserstoff zu oxidieren, aber nicht heiß genug, um den gesamten Kohlenstoff zu oxidieren. Ruß ist in der Tat das absichtliche Produkt der Rußindustrie, die Erdgas in einer sauerstoffarmen Umgebung mit niedrigen Temperaturen unvollständig verbrennt, um Ruß zu produzieren, der als Druckertinte verkauft werden kann.

Oxidation ist nicht die einzige Ursache für den Verlust von Wasserstoff auf dem Weg aus den Tiefen der Erde. Komplexe Kohlenwasserstoffe, die in der Tiefe geschmiedet werden, wären bei oberflächennahen Drücken instabil, auch wenn sie bei den Drücken, die an ihrem Entstehungsort im oberen Erdmantel, vielleicht 200 oder 300 Kilometer unter der Erdoberfläche, herrschen, stabil wären. In den oberen Gesteinen und abseits von vulkanischen Einflüssen sind die Temperaturen zu kalt, um die Moleküle gewaltsam aufzuspalten, aber es findet dennoch eine allmähliche Dissoziation von Wasserstoff aus dem Kohlenstoff statt, da sich das Kohlenwasserstoffgemisch allmählich an die niedrigeren Drücke in geringer Tiefe anpasst.

Die Existenz von Diamanten - Kristallen aus reinem Kohlenstoff - liefert uns einige sehr wichtige Informationen über die Umstände in Tiefen von mehr als 100 Kilometern. (Auf dieses wichtige Thema wird in Kapitel 7 näher eingegangen.) Der Druck, der notwendig ist, damit Kohlenstoff diese kristallografische Form annimmt, wurde zuverlässig mit 35 bis 40 Kilo-Bar bestimmt (1 Kilo-Bar entspricht dem 1000-fachen des atmosphärischen Drucks). Da der Druck in jeder Tiefe den Wert nicht überschreiten kann, der durch das Überlagerungsgewicht des Gesteins gegeben ist, konnte die Diamantbildung nicht in Tiefen unter 100 bis 150 Kilometern stattfinden. Durch die Untersuchung von Diamanten können wir also etwas über die Bedingungen in solch großen Tiefen lernen.

Zunächst muss ein Prozess am Werk sein, der hochreinen Kohlenstoff konzentriert. Das kann nur ein Strom einer kohlenstoffführenden Flüssigkeit leisten. Es müssen dort unten Porenräume existieren, durch die Flüssigkeiten fließen, die reinen Kohlenstoff ausscheiden können. Zweitens können kleine Verunreinigungen, die in einigen Diamanten vorhanden sind, in Form von Einschlüssen von Flüssigkeiten mit einem ähnlichen Druck, wie er für die Bildung von Diamanten erforderlich ist, als Proben von Flüssigkeiten angesehen werden, die in solchen Tiefen vorkommen. Dazu gehören Methan, andere leichte Kohlenwasserstoffe und CO_2. Damit ist die Frage beantwortet, in welcher Tiefe einige nicht oxidierte Kohlenstoffverbindungen in der Erde stabil sind: Sie liegt bei mindestens 100 Kilometern, kann aber auch viel größer sein. Ich vermute, dass die Dissoziation einiger Kohlenwasserstoffe der Ursprung für den reinen Kohlenstoff der Diamanten ist. Selbst

Diamanten, die in einem Druck-Temperatur-Bereich hergestellt wurden, in dem sie stabil sind, werden bei den niedrigen Oberflächendrücken instabil. Diamanten sind nicht ewig, aber lange genug, nur weil sie unterkühlt sind und nicht die Energie haben, ihre Kristallkonfiguration in die Niederdruckform zu ändern, die Graphit ist. In ähnlicher Weise werden die meisten Kohlenwasserstoffmoleküle in eine instabile Domäne ein, wenn sie zur Oberfläche aufsteigen.

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie Kohlenwasserstoffe spontan ihre Molekülmischung unter einer beträchtlichen Druck- und Temperaturänderung umgestalten, habe ich einen Doktoranden angewiesen, die chemischen Veränderungen in einer Propanprobe (C_3H_8) zu untersuchen, die einer simulierten Tiefenumgebung mit einer Temperatur von 475°C und einem Druck von 4000 Atmosphären ausgesetzt war, was einer Tiefe von etwa 10 Kilometern in einem Großteil der Erdkruste entspricht. Nach nur sechs Stunden hatte sich die Probe in ein Gemisch von C_1 bis C_5, umgewandelt, wobei das Eingangsverhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff beibehalten wurde (Abbildung 5.1). Dies zeigt, dass Kohlenwasserstoffmoleküle ohne das Eingreifen von Leben zusammengesetzt werden können; es zeigt auch, dass das Verhältnis der verschiedenen leichten Kohlenwasserstoffmoleküle, die in Öl- und Gasbohrungen zu sehen sind, durch das Druck-Temperatur-Verhältnis entlang des Aufstiegswegs bestimmt wird.

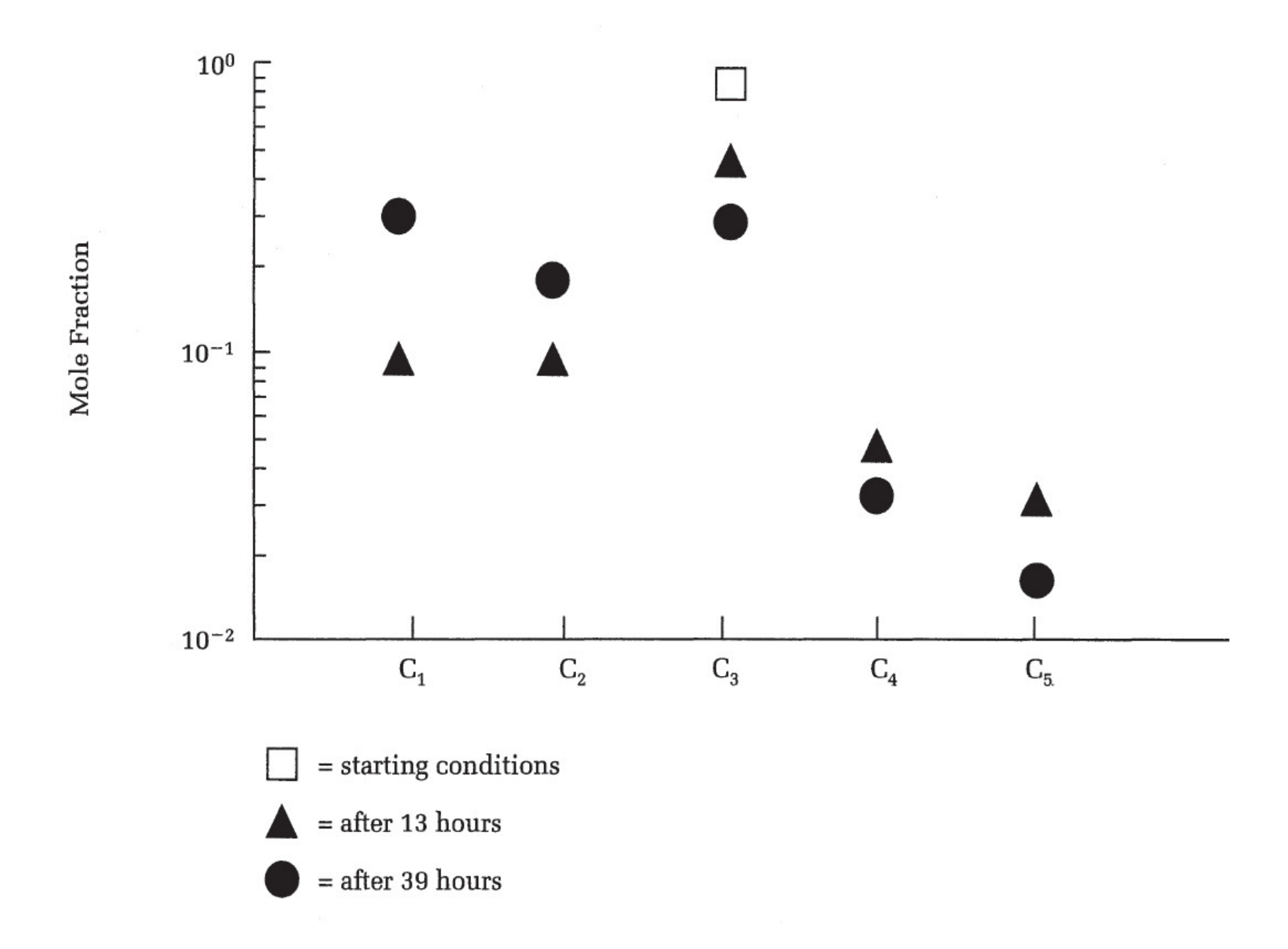


Abbildung 5.1
Spontane Modifikation von Kohlenwasserstoffen unter Wärme- und Druckänderung. In diesem Experiment wurde eine nahezu reine Menge Propan (C_3), versiegelt in einem mit Gold ausgekleideten Gefäß, 6 Stunden lang einer Temperatur von 475°C und einem Druck

von 4000 Atmosphären ausgesetzt (letzteres simuliert eine Tiefe von etwa 10 Kilometern). Unter diesen Bedingungen wandelte sich ein Teil des Propans spontan sowohl in leichtere als auch in schwerere Kohlenwasserstoffe um, wodurch das Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis in diesem geschlossenen System erhalten blieb. Die endgültige Mischung reichte von Methan (C_1) bis Pentan (C_5). QUELLE: Thomas S. Zemanian, William B. Streett, und John A. Zollweg, 1987, "Thermodynamische Berechnungen, Experimente und der Ursprung des Erdöls" (unveröffentlichte Ergebnisse). Ein ähnliches, aber komplizierteres Experiment wird berichtet in Thomas Gold *et al.*, 1986, "Experimental study of the reaction of methane with petroleum hydrocarbons in geological conditions", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50: 2411-18.

Der sequenzielle Verlust von Wasserstoff ist der Hauptgrund, warum so viele Erdölfelder schichtweise aufgebaut sind: Riesige Methanvorkommen in der größten Tiefe, leichte Öle weiter oben und die schwersten Öle obenauf (obwohl jede Tasche mit einer gewissen Menge Methan bedeckt sein kann). In einigen Feldern ist der kohlenstoffreichste und oberste Kohlenwasserstoff kein Rohöl; Rohöl ist nicht immer das Ende der Sequenz. Vielmehr kann sich über den Ölschichten Steinkohle befinden. Je schwärzer die Kohle ist (von bituminös bis anthrazit), desto größer ist der Verlust an Wasserstoff und desto größer ist das resultierende Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis.

Was ist mit den in der Kohle nachgewiesenen biologischen Molekülen? Das Vorhandensein der gleichen Art von Hopanoiden - Moleküle, die Bakterien zugeschrieben werden - in Kohle, die auch in Erdöl gefunden werden, ist ein starker Beweis dafür, dass die samen Mikroben Kohlenwasserstoffe in den Kohleschichten fressen oder gefressen haben, wie in den Erdölreservoirs (Abbildung 5.2). Nach der biogenen Theorie ist die starke Ähnlichkeit der Hopanoidarten in Kohlen und Ölen jedoch schwer zu erklären.[9] Das liegt daran, dass die Befürworter der biogenen Theorie Kohle als die veränderten Überreste von Landpflanzen und Öl als die veränderten Überreste von biologischen Abfällen aus dem Meer betrachten, obwohl es unwahrscheinlich erscheint, dass in beiden fast das gleiche mikrobiologische Material gefunden wird. Wäre Kohle ein Endprodukt von Öl, dann wäre diese Koinzidenz zu erklären.

Wo immer die Mikrobiologie eine katalysierende Rolle bei der Umwandlung eines wasserstoffreichen Kohlenwasserstoffs in einen wasserstoffarmen Kohlenwasserstoff gespielt hat, kann das Produkt bis zu einem gewissen Grad als eine biologische Schöpfung betrachtet werden - aber eine, die von einer unterirdischen Ökologie produziert wurde, die sich von abiogenen Erdölflüssigkeiten ernährt. Bei der Entstehung von Kohle ist jedoch unklar, ob und in welchem Maße Mikroben der tiefen Biosphäre beteiligt sind. Der Prozess des Wasserstoffverlustes kann durch mikrobielle Aktivität unterstützt werden oder auch nicht. So oder so kann eine positive Rückkopplung am Werk sein, sobald die ersten Atome reinen Kohlenstoffs entstanden sind. Eine Ablagerung von festem Kohlenstoff wirkt wie ein Katalysator für die weitere Ablagerung von Kohlenstoff aus Methan oder anderen Kohlenwasserstoffen. Wo andere Umstände, wie z. B. Temperatur und Druck, eine Dissoziation und anschließende Ablagerung von Kohlenstoff nahezu auslösen würden, wird das Vorhandensein von etwas Kohlenstoff den Prozess in Gang setzen. Das bedeutet, dass in einem Gebiet mit aufsteigenden Kohlenwasserstoffen die Tendenz besteht, dass die Kohlenstoffablagerungen zu großen Konzentrationen anwachsen, weil ihre bloße Anwesenheit dazu beiträgt, mehr von demselben Stoff abzulagern.

Ich habe das bei einem Experiment in meinem Labor gut kennengelernt. Wir begannen mit einem durchsichtigen Rohr aus geschmolzenem Quarz, das durch eine intensive elektrische Heizung teilweise gewölbt wurde, aber noch Platz ließ, um das Innere zu sehen. Bei steigender Temperatur wurde Methan durch das Rohr geblasen. Bei etwa 800°C erschien plötzlich ein schwarzer Fleck an der Innenwand, und innerhalb eines Sekundenbruchteils entwickelte sich ein schwarzer Streifen, der vom Anfangspunkt ausging und sich als Dreieck in Richtung des Abflusses verbreiterte. Bezeichnenderweise erschien der Kohlenstoff nicht in einem verstreuten Muster im Inneren des Rohrs. Vielmehr bildeten alle nachfolgenden Ablagerungen eine einzige, sich ausdehnende Masse, sobald der erste Fleck entstanden war; der Kohlenstoff wurde sehr schnell nach dem Erscheinen des ersten Korns abgelagert.

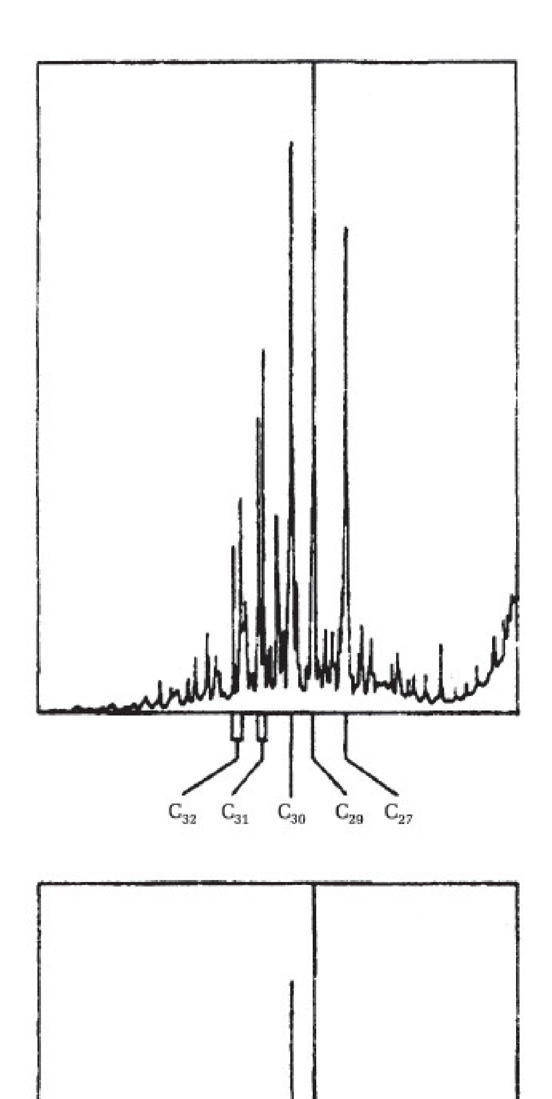


Abbildung 5.2
Ähnlichkeit der (biologischen) Hopanoidmoleküle, die in einer Kohleprobe und einer Ölprobe nachgewiesen wurden. Das obere Chromatogramm stammt aus einer lothringischen (Frankreich) Kohle, die in Schichten liegt, die auf etwa 300 Millionen Jahre datiert sind. Das untere Chromatogramm stammt von einem schweren Rohöl, das in Schichten des Aquitaine-Beckens, ebenfalls in Frankreich, gefunden wurde und auf etwa 150 Millionen Jahre datiert ist. Der Vergleich dieser Chromatogramme zeigt, dass Kohle und Öl eine ähnliche Ergänzung von Bakterien hatten, die die ungewöhnliche Form der biologischen Ablagerungen ablagerten. Die Altersangaben beziehen sich auf das enthaltende Gestein, während der Kohlenstoff möglicherweise später abgelagert wurde. QUELLE: Guy Ourisson, Pierre Albrecht und Michel Rohmer, 1984, "The microbial origin of fossil fuels", *Scientific American* 251(2): 44-51.

Zusammenfassend glaube ich, dass Kohle sowohl durch abiotische als auch durch biotische Prozesse gebildet werden kann. Was diese Theorie von der traditionellen Theorie unterscheidet, ist, dass die Kohle aus einer Quelle stammt, die aus der Tiefe aufsteigt, und nicht aus einer Ablagerung, die von der Oberfläche herabsinkt. Man könnte daher von der Auftriebskräfte-Theorie sprechen. Der Kohlenstoff ist von unten als kohlenstoffhaltiges Fluid wie Methan, Butan oder Propan eingedrungen und konnte so in die Zellen eventuell vorhandener pflanzlicher Fossilien eindringen, die sich im Strömungsweg befanden. Danach würde es sich durch den kontinuierlichen Verlust von Wasserstoff allmählich der Konsistenz annähern, die wir Kohle nennen. Schwarze Steinkohle ist ein Produkt völlig unterirdischer Prozesse; sie hat nichts mit der Biosphäre an der Oberfläche zu tun. Sie hat überhaupt nichts mit der Photosynthese zu tun. Solche Kohle ist nicht die gespeicherte Energie der Sonne.

Beweise für die Theorie des Aufquellens.

Die Beweise, die für die Auftriebstheorie der Kohlebildung sprechen, sind vielfältig und meiner Meinung nach überzeugend. Die vielleicht stärkste Widerlegung der traditionellen Theorie der Kohleentstehung findet sich in der geringen Menge an mineralischer Asche in den meisten Steinkohlen. Einige Kohleflöze sind mehr als 10 Meter dick, doch der Mineralgehalt kann bis zu 4 Prozent betragen. Der Großteil des Materials besteht nur aus Kohlenstoff, mit ein wenig Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel in verschiedenen Verbindungen gemischt. Damit ein Sumpf genügend Kohlenstoff ablagern kann, um ein solches Flöz zu erzeugen, müsste er mehr als 300 Meter tief gewachsen sein, wobei der Mineralgehalt in diesem Volumen weniger als 1 Prozent betragen würde. Solche Sümpfe gibt es heute nicht, und selbst wenn es sie einmal gegeben hätte, wäre es unwahrscheinlich, dass Pflanzen unter solchen Umständen wachsen würden.

Das Verhältnis von Mineralien zu Kohlenstoff in jeder heutigen Ansammlung von Pflanzentrümmern ist ein sehr viel höheres, und Ansammlungen der Mengen an Biomasse-Kohlenstoff, die notwendig sind, um große Kohleflöze zu erklären, werden nirgendwo gefunden. Es gibt keinen Grund, sich auf einen Umweltprozess (terrestrische Kohleentstehung) und eine Bandbreite geeigneter Oberflächenumgebungen (riesige bewaldete Sümpfe) zu berufen, die in der heutigen Welt keine Analoga haben. Eine sparsamere Theorie ist sicherlich angebracht, vor allem insofern, als wir verstehen, dass eine große Menge an Kohlenstoff im Laufe der geologischen Zeit an die Oberfläche gebracht worden sein muss.

Die Auftriebstheorie hingegen kann den geringen Mineralgehalt der Kohle erklären, und sie vermeidet die Notwendigkeit, eine Art und ein Ausmaß von Umwelt zu postulieren, die es einmal gab, aber nicht mehr existiert. Ich glaube, dass substanzielle Kohlebildung nicht nur eine Sache der Vergangenheit ist. Sie findet heute statt. Wir erkennen sie nur nicht, weil sich die Kohle größtenteils als inkrementelle Ergänzungen zu bestehenden Kohlelagerstätten bildet. Nicht nur die Öl- und Gasfelder füllen sich auf, sondern auch die Kohlelagerstätten, nur mit einer Geschwindigkeit, die zu langsam ist, als dass wir sie erkennen könnten.

Die Auftriebstheorie passt gut zu den Dimensionen der massiven Kohlelagerstätten und erklärt die geringe Menge an darin enthaltener mineralischer Asche. Vielleicht würden ganz "normale" biologische Ablagerungen in einer Sedimentschicht mit einer hilfreichen Porosität und normalen Mineralbeimengungen als Starter wirken. Ein Teil der aufsteigenden Kohlenwasserstoffe würde dort dissoziiert werden; die Fossilien in diesem Gestein würden sich mit Kohlenstoff anreichern, und wenn sich mehr Kohlenstoff ansammelt, würde dies weitere Anreicherungen von Kohlenstoff stimulieren. Am Ende kann die dem ursprünglichen Pflanzenmaterial zuzuschreibende Kohlenstoffmenge ein unbedeutender Bruchteil sein, und das Kohlenstoff- Mineral-Verhältnis kann Werte erreicht haben, die in der Oberflächenvegetation nie vorkommen. Die häufig vorkommende vertikale Stapelung von Kohleflözen zeugt dann lediglich davon, dass es sich um ein Gebiet handelt, in dem Kohlenwasserstoffflüssigkeiten über längere Zeiträume ausgegast sind und in dem die Umstände die Dissoziation und die Ablagerung von Kohlenstoff leicht begünstigt haben. Dies erklärt auch eine andere Beobachtung, die in letzter Zeit viel erforscht wurde: Kohle scheint oft große und wirtschaftlich verwertbare Mengen an Methangas zu produzieren, besonders wenn der Grundwasserdruck in der Umgebung eines Kohleflözes abgesenkt wird. Es wird dann gesagt, dass dieses Methan in der Kohle gebunden sein muss. Aber Methan bewegt sich ziemlich frei durch die Kohle, und es lässt sich kein Grund finden, warum es sich konzentriert haben sollte und dort für Zeiträume so lange wie das Alter eines bestimmten Kohleflözes verbleiben sollte. Es ist wahrscheinlicher, dass das Vorhandensein der Kohle ein guter Indikator für das aufsteigende Methan ist.

Während der Aschegehalt in der Kohle weit geringer ist, als es die biogene Theorie vorhersagen würde, sind die Konzentrationen von Spurenmineralien weitaus größer sein, als die traditionelle Sichtweise erklären kann. Der bei weitem größte vom Menschen verursachte Beitrag zur radioaktiven Verschmutzung ist nicht das Austreten von Abfällen und Kühlwasser aus Kernkraftwerken, sondern uranhaltige Abgase aus den Schornsteinen von Kohlekraftwerken. Zusätzlich zum Uran finden sich in der Kohle oft Metalle wie Quecksilber, Gallium und Germanium in einer Konzentration, die weit über den normalen Sedimentationswerten liegt. Dies sind keine Metalle, von denen man erwarten könnte, dass sie von Pflanzen angereichert wurden. Daher vermuten die Befürworter der biogenen Theorie der Kohlebildung, dass einige Kohleflöze mit der gleichen Wirkung wie die Holzkohle in Zigaretten und in Wasserfiltern gewirkt haben müssen: Sie extrahieren die Metalle, die durch sie hindurchgehen. Aber in den meisten Fällen von extremen Konzentrationen ist es schwierig zu sehen, wie das Grundwasser genug von der Substanz durch die Kohle hätte transportieren können, selbst wenn alles, was durchging, dort aufgehalten worden wäre. Im Gegensatz dazu besagt die Auftriebstheorie, dass Kohle, ähnlich wie Erdöl, aus Kohlenwasserstoffen gebildet wird, die aus der Tiefe heraufgebracht werden und während ihrer Reise Mineralien auslaugen.

Eine weitere Anomalie, die für Geologen schwer mit der biogenen Theorie zu erklären ist, ist das Vorhandensein von Kohleflözen an Orten, an denen sie nicht sein sollten und an Neigungen, die sie nicht einnehmen sollten. Die meisten kommerziell abgebauten Kohleflöze sind zwischen Sedimentschichten geschichtet, aber viele Kohlelagerstätten auf der Welt sind es nicht. Kohle, die in vulkanischer Lava eingebettet ist und keine Sedimente enthält, ist in mehreren vulkanischen Gebieten bekannt, vor allem im Südwesten Grönlands.[10] Dort wird Kohle in unmittelbarer Nähe zu großen, lavakrustierten Klumpen metallischen Eisens gefunden, nicht weit entfernt von Schlammvulkanen, die Methan ausstoßen, und von einer Felswand, aus deren Rissen häufig Flammen austreten.[11] Eine weitere bemerkenswerte nicht-sedimentäre Lagerstätte befindet sich in New Brunswick, Kanada. Dort füllt eine Kohle namens Albertit einen fast vertikalen Riss, der durch viele horizontal gelagerte Sedimentschichten geht. Sie wurde im letzten Jahrhundert abgebaut, aber die Schwierigkeit, ein fast vertikales Flöz abzubauen, führte dazu, dass der Betrieb eingestellt wurde.[12] Die biogene Theorie kann keine auch nur annähernd plausible kausale Erklärung für diese und andere anomale Kohleumgebungen bieten.

Auch ist es nicht ungewöhnlich, in einem Kohleflöz Klumpen von Karbonatgestein zu finden und beim Aufbrechen Fossilien zu finden, die Holz enthalten - nicht schwarz, sondern von heller Farbe - und keine Anzeichen der Umwandlung in Kohle zeigen. In ähnlicher Weise wird berichtet, dass in der Kohle des Donetz-Beckens in der Ukraine versteinerte Baumstämme gefunden werden können, die sich durch ein Kohleflöz von dem darunter liegenden Karbonatgestein zu dem darüber liegenden erstrecken. Diese Fossilien sind dort verkohlt, wo sie sich innerhalb des Kohleflözes befinden, und nicht verkohlt, wo sie sich im Karbonat befinden.[13]

Viele Forscher haben auf die zahlreichen Ungereimtheiten hingewiesen, die man sieht, wenn man die Kohle an den Stellen, an denen sie jetzt gefunden wird, als Ergebnis von Sumpfablagerungen interpretieren will. H. R. Wanlass z. B. war verblüfft über das Vorhandensein von zwischengelagerten Tonschichten in einigen kohleführenden Regionen, die nur einen oder wenige Zentimeter dick waren und sich horizontal durch die Kohlen hindurch ungebrochen über Entfernungen von mehreren hundert Meilen erstreckten. Er urteilte daher, dass es "genügend Einwände gegen alle vorgeschlagenen Theorien über den Ursprung dieser Tone gibt, um jede einzelne als lächerlich erscheinen zu lassen."[14]

Die geografische Verteilung der Kohlevorkommen stellt ein weiteres Problem für die konventionelle Theorie dar. Man geht davon aus, dass Öl und Kohle das Ergebnis völlig unterschiedlicher Arten von biologischen Ablagerungen sind, die sich unter ganz unterschiedlichen Umständen und in vielen Regionen, in denen beide vorkommen, zu ganz unterschiedlichen Zeiten abgelagert haben. Für die Bildung von Erdöl werden in der Regel biologische Ablagerungen von Meeresalgen herangezogen, für die von Kohle terrestrische Vegetation. Man würde also keine enge Beziehung zwischen den geografischen Verteilungen der beiden Stoffe erwarten. Tatsächlich aber ist mit der immer detaillierteren Kartierung der Öl- und Kohlevorkommen eine enge Beziehung unverkennbar geworden. Die Kohle- und Ölkarten des südöstlichen Brasiliens sind in dieser Hinsicht auffällig (Abbildung 5.3). Indonesien ist ein weiteres Beispiel dafür; eine lokale Überlieferung unter denen, die dort nach Öl bohrten, lautete: "Sobald wir auf Kohle stießen, wussten wir, dass wir auf Öl stoßen würden."

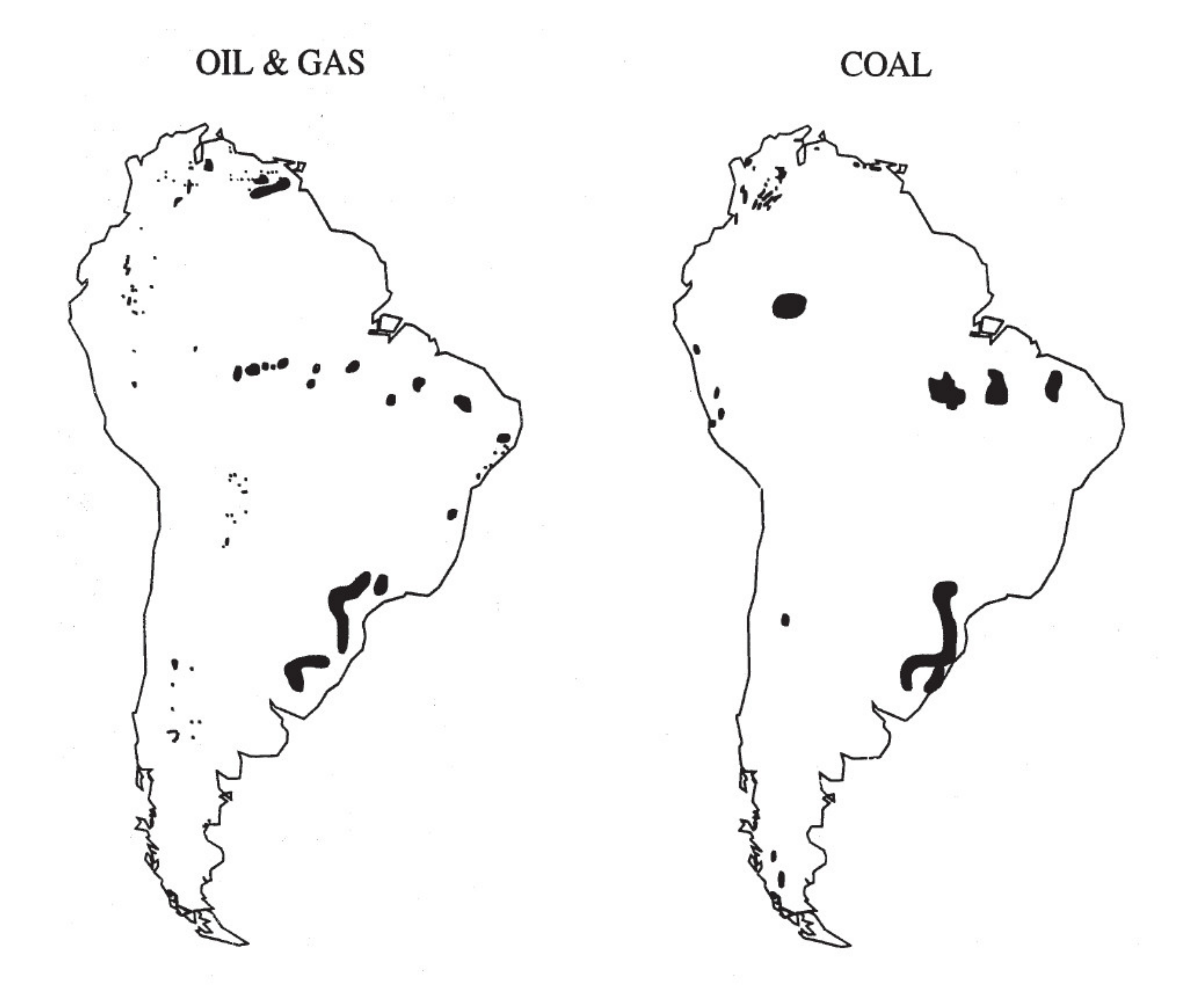


Abbildung 5.3
Überschneidungen in der Verteilung von Kohle und Öl im Osten Brasiliens. Es gibt viele weitere solcher Überschneidungsgebiete, was für die biogenen Theorien der Kohle- und Ölbildung ein Problem darstellt, aber durch die abiogene Theorie leicht erklärt werden kann. QUELLE: Ölkarte angepasst aus International Petroleum Encyclopedia, 1994, S. 85; Kohlekarte angepasst aus einem kommerziellen Atlas der H. M. Goushu Company, San Jose, Kalifornien.

Kohle oben und Öl unten ist ein so häufiges Merkmal, dass der Zufall dies unmöglich erklären kann. In Wyoming befindet sich sogar etwas Kohle *innerhalb* der Ölreservoirs. In vielen Sedimentbecken, darunter das San Juan Becken in New Mexico und das Anadarko-Becken in Oklahoma, liegt die Kohle direkt über dem Öl und Gas (Abbildung 5.4). Alaska, Iran, Saudi- Arabien und das Uralgebirge - alle bekannt für ihre Ölfelder - besitzen ebenfalls große Mengen an Kohle. Das Gleiche gilt für viele andere große Ölfördergebiete wie Venezuela, Kolumbien und den Pennsylvania-Abschnitt des Appalachen Gebirges.

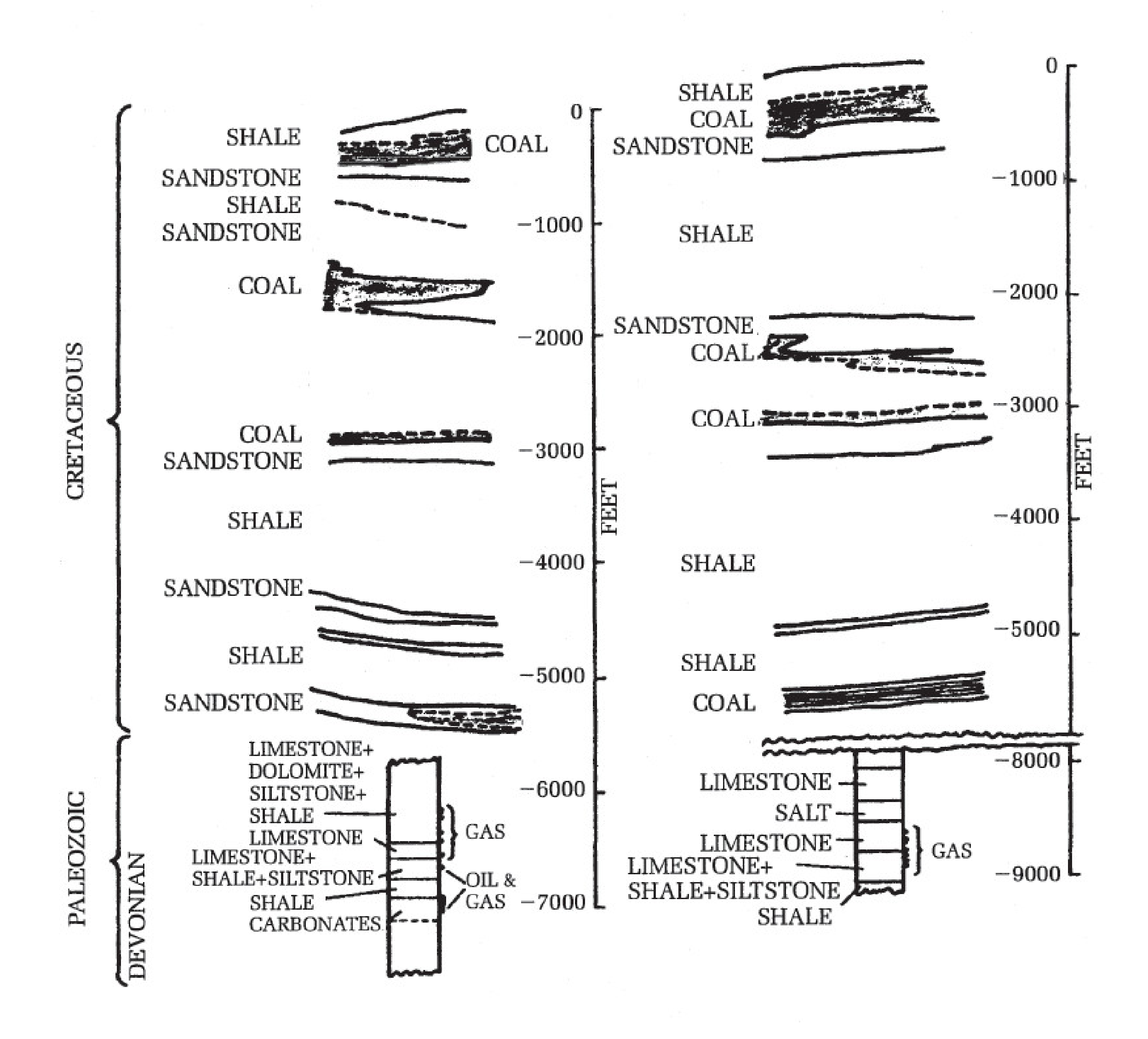


Abbildung 5.4
Ein Beispiel für die vertikale Stapelung von Gas-, Öl- und Kohlelagerstätten in San Juan County, New Mexico. Das Diagramm links ist ein Querschnitt durch das Hogback- Feld; rechts ist das Barker-Creek-Feld dargestellt.

Bedenken Sie auch, dass einige Kohlefelder mehr Methan enthalten und liefern, als von der vorhandenen Kohle möglicherweise produziert werden könnte. Von Kohle, die noch nicht zu fast reinem Kohlenstoff "geschwärzt" ist, würde man nach der biogenen Theorie erwarten, dass sie diese Wasserstoffatome langsam abgibt, wahrscheinlich in Form von Methan. Wenn das Methan jedoch von der Kohle selbst erzeugt wird und nicht aus einer noch größeren Tiefe aufsteigt, sollte es nur in sehr begrenzten Mengen vorhanden sein. Das ist nicht immer der Fall - zum Leidwesen der Kohlebesitzer und Bergleute. Selbst bei einer sehr schnellen, erzwungenen Luftströmung werden viele Kohlebergwerke von Methanexplosionen geplagt. Auf Hokkaido, der Nordinsel Japans, ist der Kohleabbau zum Erliegen gekommen, weil selbst in den bestbelüfteten Kohlegruben der Welt größere Explosionen nicht vermieden werden konnten. Die Erklärung für das Übermaß an Methan

ist meines Erachtens, dass das Methan aus der Quelle, die das Kohlevorkommen geschaffen hat, immer noch nach oben strömt. Die Kohle bildet sich immer noch!

Torf und Braunkohle, eine Ausnahme.

"Was ist mit Torf, und was mit Braunkohle?" höre ich meine Kritiker erwidern. "Sie behaupten doch sicher nicht, dass diese abiogen sind!"

Nein, das behaupte ich nicht. Vielmehr stellen Torf und Braunkohle (letztere ist eine "Braunkohle", in der man noch die Struktur der ursprünglichen Pflanzen erkennen kann) eine höchst interessante Partnerschaft zwischen biogenen und abiogenen Kohlenstoffquellen dar.

Es gibt eine subtile Verbindung zwischen Torf und Braunkohle auf der einen Seite und Öl und Kohle auf der anderen. Torf und Braunkohle geben deutliche Hinweise darauf, dass sie von Pflanzen an Orten gebildet wurden, an denen die üblichen Zersetzungsprozesse nicht funktionierten und daher der Kohlenstoff und andere Bestandteile der Pflanzen nicht an die Atmosphäre zurückgegeben wurden. Eine Möglichkeit, wie dies geschehen kann, wird allgemein diskutiert. Wenn genügend Pflanzen in ein Gewässer sinken und es so in einen stagnierenden Sumpf verwandeln, dann wird die Absorptionsrate von Luftsauerstoff gering sein. Sobald auch nur eine kleine Menge der Pflanzenreste von anaeroben Mikroben zersetzt wird, können die chemischen Bedingungen im Becken so feindlich werden, dass jede weitere Zersetzung verhindert wird. Der Kohlenstoffgehalt der Pflanzenfasern wird nicht in Kohlendioxid umgewandelt, das entweichen würde, sondern hinterlässt einen Kohlenstoffschlamm oder einen kohlenstoffhaltigen und faserigen Materialschwamm, der lange Zeit überlebt und gleichzeitig den Wasserfluss aufhält.

Die sauerstoffarme Situation im Sumpfgebiet ist oft auf das schnelle Wachstum von Bakterien zurückzuführen, die alle verfügbaren Sauerstoffatome plündern, um für ihren Stoffwechsel das von unten aufsteigende abiogene Methan zu verbrennen. Da Methan ein so begehrtes Nahrungsmittel ist, werden die methanotrophen Mikroben diejenigen verdrängen, die sonst den Sauerstoff nutzen würden, um die Pflanzentrümmer anzugreifen, deren Zellulose- und Ligninmoleküle besonders widerstandsfähig sind. Ein Sumpf wird dann aus dem gesamten Pflanzenmaterial gebildet, das sich angesammelt hat und noch nicht zersetzt ist.

Torfbildende Bedingungen können auch unter ganz anderen Umständen als im Sumpfbeispiel entstehen. Ein Torfmoor muss nicht in einer Schale liegen, die keinen natürlichen Wasserabfluss hat. Ein Torfmoor kann auch in der Lage sein, Wasser in dicken Schichten von Pflanzenresten über lange Zeit zu halten, ohne dass die Topographie dabei hilft. In der Schweiz wurden Stellen gefunden, an denen ein Stück torfiges Terrain - d.h. ein Stück sehr weicher Boden, der mit der gleichen Flora bewachsen ist, die für Torfmoore charakteristisch ist - an steilen Hängen entlang von Verwerfungslinien vorkommt, die quer zur Hangneigung verlaufen. Der Wasserfluss scheint nicht behindert worden zu sein, aber entlang der Verwerfungen lässt sich ein messbarer Ausstoß von Methan feststellen. Meiner Meinung nach ist es daher wahrscheinlich, dass die Methanausgasung Torf- und Braunkohleablagerungen in Regionen erzeugt, die einen starken Kohlenwasserstofffluss überlagern. Ich vermute, dass dies tatsächlich die Erklärung für das nicht seltene Vorkommen von Torf- und Braunkohlefeldern an der Oberfläche ist, die produktive Öl- und Gasfelder überlagern.

Eine weitere Beobachtung bestätigt diesen vermuteten kausalen Zusammenhang zwischen Torf und einer bedeutenden Quelle von Methanausgasungen. Ich habe Messungen der Gase durchgeführt, die aus einem großen kommerziellen Torffeld in Kanada ausströmen. Die Ergebnisse waren verblüffend. In diesem Torffeld waren die Gase direkt unter der Oberfläche stark mit Methan angereichert, wie es in solchen Umgebungen üblich ist - ein Zustand, den die Befürworter der biogenen Theorie natürlich auf das Vorhandensein von Methan ausscheidenden Bakterien zurückführen, die sich von den Pflanzenresten in einer sauerstoffarmen Umgebung ernähren. Aber die Gase waren auch mit allen anderen Kohlenwasserstoffgasen von C_2H_6 bis C_5H_{12} angereichert. Diese Mischung wird normalerweise von Pflanzen in keinem ihrer Zerfallsstadien produziert. Ganz einfach: Mikroben scheiden bei der Zersetzung von Kohlenhydraten kein Pentan aus.

Neugierig und mit meiner Auftriebstheorie im Hinterkopf bat ich darum, ein Loch weit außerhalb dieses kanadischen Torffeldes in den örtlichen Boden zu bohren, der kein torfähnliches Material enthielt. Die an dieser Stelle entnommenen Gase erwiesen sich als sehr ähnlich zu der Gaszusammensetzung im Torffeld selbst. Das gesamte Gebiet zeigte die gleichen Anzeichen von Kohlenwasserstoffen. Dies deutete für mich darauf hin, dass die meisten der im Torffeld nachgewiesenen Gase tatsächlich von unten eingedrungen waren und somit den Gasen entlang der gleichen Verwerfungslinie ähnlich waren. Warum waren in dieser Region der Ausgasung einige Stellen torfig, während andere nicht torfig waren? Ich vermute, dass die unterschiedliche Reinigungswirkung der verschiedenen Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten ein Faktor gewesen sein könnte.

Persönliche Erfahrungen mit den eigenen Sinnen - ergänzend zu den Erfahrungen, die durch die Technologie etwas entfernt sind oder in der Bibliothek ganz entfernt wurden - bieten einen starken Anreiz, um erhaltene Ansichten zu hinterfragen. Ich habe eine lebhafte Erinnerung an ein solches Erlebnis in der Schweiz. Ich wanderte an einem ziemlich steilen Hang entlang, direkt oberhalb eines kleinen Baches. Der Boden war nicht von Vegetation bedeckt, sondern von einem schleimigen Schlamm. Ein Kollege, der mich führte, bückte sich und steckte seine fünf Finger ganz willkürlich in den Schlamm. Dann holte er ein Feuerzeug heraus und schwenkte die Flamme um die Löcher, die seine Finger gemacht hatten. Es leuchtete alles auf, ähnlich wie die Gasbrenner auf einer Kochplatte in der Küche! Diese Erfahrung haben offenbar auch viele andere gemacht, allerdings in einem anderen Land. Ich erinnere mich, gehört zu haben, dass in einem Tonfeld in der Nähe von Oxford, England, die Arbeiter, die den Ton abbauten, eine ähnliche Situation nutzten, um ihr Mittagessen zu kochen.

Torf und Braunkohle sind eindeutig biologische Materialien, aber der Grund für ihre Anreicherung kann durchaus in den Umständen liegen, die durch nichtbiologische Kohlenwasserstoffe geschaffen werden, die zufällig von unten aufsteigen und die auch mehr Kohlenstoff hinzufügen können, als in den beteiligten Pflanzen enthalten ist. Es gibt viele Stellen, an denen man eine solche Verschwörung zwischen der Oberflächenbiologie und der tiefen Erde vermuten kann. Große Torfvorkommen auf Sumatra befinden sich über öl- und gasreichen Regionen. Einige Braunkohlelagerstätten (z.B. am Nordufer der Magellanstraße auf der Atlantikseite) haben kommerzielle Öl- und Gasvorkommen direkt darunter. Das benachbarte Tierra del Fuego - Land des Feuers - könnte von Magellan so benannt worden sein, als er Flammen aus dem Boden aufsteigen sah. Dieses Phänomen hat Eingang in die Folklore gefunden, in der sich erschreckende Geschichten um das immer vorhandene "Sumpfgas" ranken, das sich spontan entzünden kann.

Entscheidend ist, dass die Schwarzkohle nicht fließend in die Braunkohle und dann in den Torf übergeht. Vielmehr gibt es eine scharfe Diskontinuität zwischen Schwarz- und Braunkohle - und, wie ich finde, auch eine scharfe Diskontinuität zwischen den Umständen ihrer Entstehung. Schwarzkohlen sind die Nachkommen der tiefen Erde, geformt und glasiert von einer tiefen Biosphäre, die sich von einem fließenden Strom von Nahrungsmitteln ernährt. Im Gegensatz dazu sind Braunkohle und Torf die Nachkommen der Oberflächenbiosphäre - eingefangene und zwischengespeicherte Sonnenenergie, die dank eines Bades von Kohlenwasserstoffgasen, die von unten nach oben strömen, oft stabil gehalten wird.

Aber was ist mit Kerogen? Kerogen ist ein teer- oder kohleähnliches Material, das als kleine Flecken diffus in verschiedenen Gesteinsschichten verteilt ist. Wie Erdöl wurde es nie in einem Becherglas zusammengebraut, sondern mit biologischen Komponenten jeglicher Art begonnen und Temperaturen und Drücken jeglicher Art ausgesetzt. Wann immer Kerogen in der Nähe eines Erdölvorkommens gefunden wird, wird es zum "biologischen Ausgangsmaterial" erklärt, das das in der Nähe gefundene Erdöl hervorgebracht hat. Befindet sich kein Kerogen in der Nähe, dann wird angenommen, dass das Erdöl von einem "Quellgestein", das sicherlich einmal Kerogen enthielt, vielleicht über eine große seitliche Entfernung eingewandert ist. Diese Erklärung für den Ursprung des Erdöls ist in der Tat zentral für die biogene Theorie. Aber wie konnte ein konzentriertes Erdölreservoir aus einer Menge von Kohlenwasserstoffen entstehen, die vorher spärlich in einem viel größeren Volumen von Gestein verteilt waren? Eine Erklärung für dieses Kuriosum wurde bisher nicht angeboten. Da es tatsächlich chemische und isotopische Ähnlichkeiten zwischen dem Kerogen und dem benachbarten Erdöl gibt, führen die Anhänger der biogenen Theorie diese Tatsache zu ihren Gunsten an. Aber warum sollten das Kerogen und das Erdöl in der Region nicht aus demselben aufsteigenden Strom von Kohlenwasserstoffen entstanden sein?

So scheinen viele Wissenschaftler, die versuchen, die Kohle zu verstehen, in den Trott der nächstliegenden bequemen Theorie verfallen zu sein. Sie erforschen das Terrain dieser Furche sehr effektiv, bis hin zu den kleinsten Merkmalen innerhalb der Wände, doch sie klettern nicht heraus, um einen weiteren Blick zu werfen. "Mit einem Fossil kann man nicht streiten", war eine Bemerkung, die mir während eines Vortrags, den ich zu diesem Thema hielt, entgegengeschleudert wurde. Es stimmt, dass man die biologische Natur des Fossils nicht bestreiten kann, aber man kann sicherlich neu darüber nachdenken, was seine Anwesenheit für das Material, das es umgibt, impliziert.

Kapitel 6

Das Siljan Experiment

In den frühen 1980er Jahren war ich davon überzeugt, dass die abiogene Theorie der Erdölbildung im Wesentlichen richtig war. Ich wusste auch, dass zur Lösung des Erdölparadoxons die abiogene Theorie durch eine Theorie der, wie ich sie nannte, tiefe heiße Biosphäre ergänzt werden muss. Ich wusste jedoch, dass solche Ansichten, die sich auf die weit verbreitete Existenz von Methan und anderen Kohlenwasserstoffen tief in der Erdkruste beziehen, im Westen nicht ernst genommen werden würden, solange ich nicht einen klaren, praktischen Beweis für ihre Gültigkeit vorlegen konnte. Die theoretischen Argumente und indirekten empirischen Beweise, die in den vorangegangenen drei Kapiteln vorgestellt wurden, würden für sich genommen nicht ausreichen, um das herrschende Paradigma umzustoßen. Vielmehr müsste ich beweisen, dass Kohlenwasserstoffe tatsächlich in einer Tiefe und in einer Gesteinsart vorkommen, für die die biogene Theorie keine Erklärung bieten kann. Ich müsste also das Interesse wecken, an einem Ort nach Öl zu bohren, der nach der herrschenden Meinung zu den schlechtesten aller möglichen Aussichten gehört.

Die Entdeckung von Öl oder Gas in selbst kleinen Mengen an einem solchen Ort könnte überzeugend sein, aber eine kommerzielle Förderung an solchen Orten wäre besser. Wahrscheinlich würde nichts unterhalb dieser Größenordnung für Aufsehen sorgen. Ein Erfolg in dieser Hinsicht wäre von mehr als wissenschaftlichem Wert. Es wäre ein Kunststück von enormer wirtschaftlicher Bedeutung - erstens, weil die Prognose für die künftige Energieversorgung großen Einfluss auf die Öl- und Gaswirtschaft hätte, zum anderen, weil ein neues Denken und neue Explorationstechniken aufgezeigt würden, mit denen dann rund um den Globus neue Funde gemacht werden könnten. Ich müsste jedoch Parteien mit Geld und Fachwissen davon überzeugen, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass die Gebiete, die jetzt als reich an Öl und Gas bekannt sind, nicht die einzigen sind. Ich müsste stichhaltige Argumente dafür vorbringen, dass dieser wertvolle Rohstoff weitaus weiter auf dem Globus verbreitet ist als bisher angenommen und dass die Abhängigkeit vieler Länder von Ölimporten infolgedessen stark reduziert werden würde.

Wie konnte ich dazu übergehen, Kohlenwasserstoffe, möglicherweise in kommerziellen Mengen, an neuen Orten zu finden - an Orten, die nach der herkömmlichen Theorie völlig unerwartet wären? Wie könnte ein Akademiker wie ich plötzlich zu einem Unternehmer werden, der in der Lage ist, an einem Ort meiner Wahl nach Kohlenwasserstoffen zu suchen und zu bohren - oder zumindest eine relativ technische Operation dieser Art zu leiten?

Schweden schien mir ein besonders günstiger Standort für ein solches Experiment zu sein. Ich hatte dieses Land Jahre zuvor ausgiebig bereist und dabei beobachtet, dass an vielen Stellen, an denen granitisches Grundgestein freigelegt war, Risse im Gestein mit einer Substanz gefüllt waren, die wie Teer aussah. Als ich schwedische Geologen um eine Erklärung bat, warum Teer durch den Granit aufsteigen würde, erzählten sie mir folgende Geschichte. Es muss einmal eine dicke Sedimentschicht über dem größten Teil des schwedischen Grundgesteins gegeben haben, und die organischen Materialien in diesem Sediment produzierten Öl. Risse, die im darunter liegenden Gestein entstanden, saugten dieses Öl nach unten, und nun, Millionen von Jahren später, sickert es wieder nach oben.

Diese Erklärung ergab für mich keinen Sinn. Wasser in biologischen Ablagerungen in den Sedimenten wäre sicherlich viel häufiger als Öl, und wir haben alle beobachtet, dass Öl auf Wasser schwimmt. Wie könnte dann Öle die Hauptkomponente sein, die nach unten in die Risse des Grundgesteins eindringt? Diese Überlegung hatte mich einige Jahre lang beschäftigt und schien an sich ein gutes Argument für die Abiogenitätstheorie zu sein. Meiner Ansicht nach stellte das schwedische Grundgebirge eine unvollständige Barriere für von unten aufsteigende Kohlenwasserstoffe dar, die an die Oberfläche gelangen könnten.

Schweden würde auch einen Vorteil als Testgelände bieten, da es ein wohlhabendes und technologisch fortgeschrittenes Land ist, das jedoch fast alle benötigten Brennstoffe importiert. Wenn man in Schweden in den Untergrund bohrt und kommerzielle Mengen der Öle findet, die für die Teerpfützen an der Oberfläche verantwortlich sind, könnte das auf eine ideale Energielösung für die Einwohner dieses Landes hinweisen. Für mich wiederum bedeutete das Bohren in das Eruptivgestein, dass sedimentäres Material komplett vermieden werden konnte und somit kein biologischer Ursprung festgestellt werden konnte, wenn in der Tiefe tatsächlich Öle gefunden wurden. Die abiogene Theorie der Erdölbildung würde damit im Feld bestätigt werden.

Bohrungen im schwedischen Granit

Eine unerwartete Gelegenheit ergab sich 1983, als ich eine Einladung erhielt, einen Tag in Stockholm zu verbringen, um hochrangigen Beamten der schwedischen Energiebehörde (Vattenfall) meine Ideen zu erläutern, eine Einladung, die von einem befreundeten Anwalt in Washington vermittelt worden war, der Leute bei Vattenfall kannte. Wenn ich jetzt den Text meiner Präsentation durchlese, die ich vor fünfzehn Jahren gehalten habe, sehe ich, dass meine Vorbohrung-Argumente damals so formuliert waren, wie ich sie heute formulieren würde. Hier sind einige Passagen aus dieser Präsentation, die auf Schwedisch in einer Tageszeitung nachgedruckt wurden.[1]

"Man ging davon aus, dass Erdgas (hauptsächlich Methan), wie auch alles natürliche Erdöl, auf der Erde immer biologischen Ursprungs ist. Auf dieser Grundlage konnte der Boden Schwedens, der fast ausschließlich aus Urgestein und nicht aus Sedimenten besteht, nicht ernsthaft als Quellmaterial für Kohlenwasserstoffe in Betracht kommen. Die zahlreichen Austritte von Methan, Teeren und Ölen, die im Grundgestein Schwedens vorkommen, sind in diesem Zusammenhang schon lange als geologisches Rätsel bekannt, und es wurden verschiedene Erklärungsversuche vorgebracht. Inzwischen wissen wir, dass die Tiefbohrung auf der Kola-Halbinsel im hohen Norden des europäischen Russlands [von den Sowjets in der Nähe der Stadt Nikel gebohrt] in ähnlichem kristallinen Gestein in elf Kilometern Tiefe Methan als eines der Hauptgase in den Rissen findet. Eine Erklärung im Sinne eines Versickerns von biologischem Oberflächenmaterial nach unten erscheint da nicht angemessen.

"Schweden würde dann als eine Masse kristallinen Gesteins [aus einer vulkanischen Schmelze kristallisiertes Gestein] gesehen werden, die den Aufwärtsstrom von Gasen und Flüssigkeiten aus den tieferen Schichten darunter behindert, die in diesem Bereich der Erdkugel besonders reich an Kohlenwasserstoffen. Die Umgebungen Schwedens weisen alle hohe Kohlenwasserstoffwerte auf. Der norwegische Graben, der sich von der holländischen Küste bis zum Nordkap und darüber hinaus erstreckt, bildet auf der einen Seite

den Fluchtweg. Auf der Kola-Halbinsel sowie in den baltischen Staaten gibt es Hinweise auf Methan oder sogar dessen Produktion. In Schweden sind die einzigen Fluchtwege Klüfte im Grundgestein.

"In den meisten Fällen entwickelt kristallines Gestein keine ausreichende Porosität, um Öl- oder Gasvorkommen in kommerziellen Mengen zu halten. Man muss daher nach Stellen suchen, an denen das Gestein gründlich zertrümmert und in poröses Geröll umgewandelt wird. Es gibt mehrere Gebiete in Schweden, die dafür in Frage kommen, aber das bei weitem prominenteste ist der Siljan-Ring [in der Nähe der Stadt Rättvik in Mittelschweden; Abbildung 6.1]. Vor 360 Millionen Jahren schlug dort ein großer Meteorit ein und erzeugte einen Krater mit einem Durchmesser von etwa 44 Kilometern. Ein Einschlag dieser Größenordnung würde das kristalline Gestein durch die gesamte Erdkruste hindurch zertrümmern, und wenn sich der Boden nach dem Ereignis wieder ausrichtet, wird das gesamte Innere des Kraters bis in große Tiefe eine Region aus porösem Schutt sein. Dieses glückliche Ereignis schuf nicht nur die schönen Seen des Siljanringes, sondern es hinterließ auch eine tief zerklüftete und poröse Region im Inneren des Kreises, in der Flüssigkeiten von unten aufsteigen und sich sammeln konnten [Abbildung 6.2]. Das Schwedische Geologische Landesamt hat bereits festgestellt, dass das Gestein in dieser Region tatsächlich zerklüftet ist, und eine Schwerkraftuntersuchung stimmt mit dem erwarteten Grad an Porosität überein. Das Innere des Siljanringes stellt somit ein mögliches Reservoir dar, das nach allen Maßstäben enorm groß ist.

"Flache Ebenen in porösem Gestein enthalten keine ausbeutbaren Gaskonzentrationen, es sei denn, es gibt ein besonders dichtes Deckgestein, das es unten hält. Das mag es geben, aber wir haben keinen Grund, es in Siljan zu erwarten. In tieferen Schichten ist die Situation anders. Das Gestein komprimiert unter dem Gewicht des Deckgebirges und neigt dazu, Bereiche niederzuhalten, in denen ein Hochdruckgas die Poren offen gehalten hat. Diese Art der Behinderung des Aufwärtsflusses von Gasen tritt in der Regel in einer Tiefe von drei bis fünf Kilometern in Sedimenten auf, muss aber in tieferen Schichten im härteren Granitgestein erwartet werden. In der sowjetischen Bohrung in Kola wurde in einer Tiefe von sieben Kilometern ein plötzlicher Wechsel zu einer erweiterten Bruchporosität festgestellt, und dies stellt wahrscheinlich die Tiefe dar, in der dieser Gesteinstyp zerbricht. Unterhalb dieses Niveaus gibt es dann Porositätsdomänen, die durch den Gasdruck offen gehalten werden, wenn tatsächlich Gase aus Regionen mit noch viel höherem Druck weit unten aufgestiegen sind.

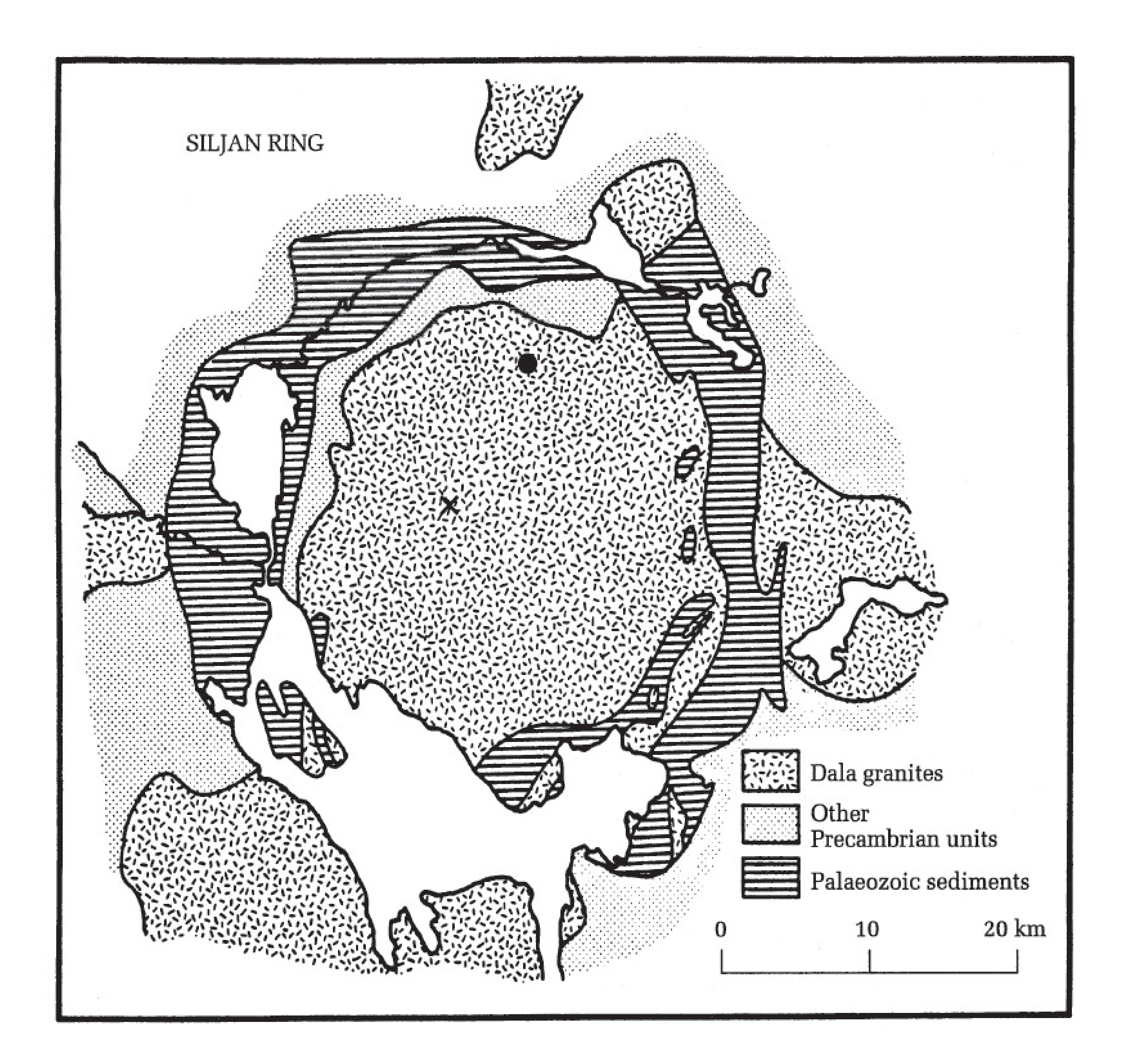


Abbildung 6.1
Geologische Oberflächenkarte der Siljan-Ring-Impaktstruktur. Die weißen Flächen sind Seen. Die Sedimente sind nirgends tiefer als300 Meter. Es wurden zwei Tiefbohrungen niedergebracht: Die erste bei Gravberg, bis zu einer Tiefe von 6,7 Kilometern (gekennzeichnet durch einen schwarzen Punkt), die zweite bei Stenberg, bis zu einer Tiefe von 6,5 Kilometern (gekennzeichnet durch ein Kreuz). QUELLE: Geologischer Dienst von Schweden.

"Man kann Glück haben und in flacheren Schichten öl- oder gashaltiges Deckgestein finden. Wenn nicht, muss man bis in eine Tiefe von sieben oder acht Kilometern bohren, was immer noch im Bereich der modernen Technik liegt. Wenn festgestellt wird, dass es sich tatsächlich um ein Gebiet handelt, in dem Methan aus tiefen Schichten ausströmt, dann ist zu erwarten, dass die verschlossenen Schichten mit dem Gas gefüllt sind und der Ausfluss an der Spitze tatsächlich den Überlauf darstellt. Die Größe des Gebietes würde es zu einem wahrhaft gigantischen Gasfeld nach jedem Standard machen.

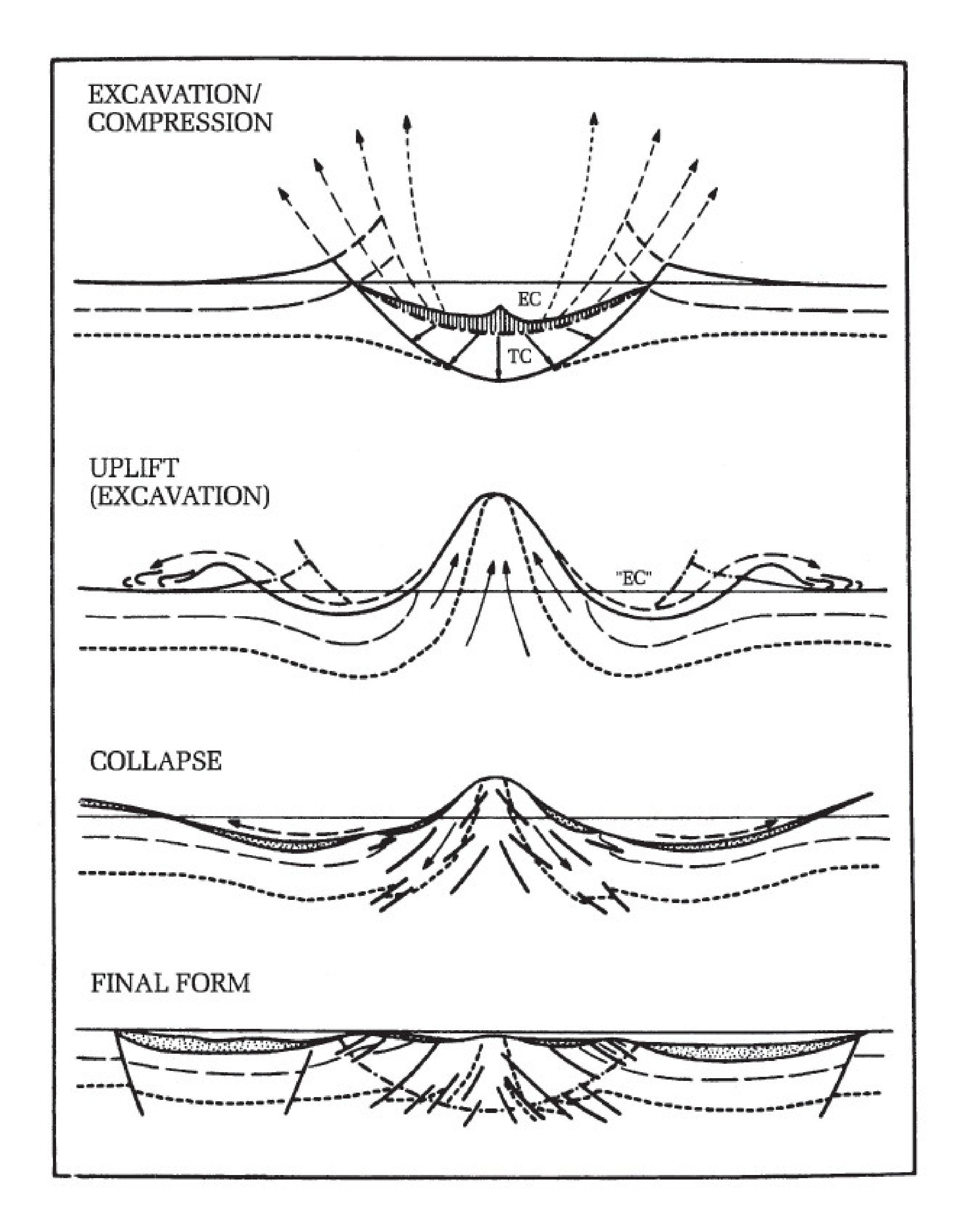


Abbildung 6.2
Entstehung eines Einschlagskraters wie dem Siljanring. Beachten Sie die zahlreichen Brüche, die die Aufwärtswanderung von Flüssigkeiten aus der Tiefe erleichtern. Nach R. A. F. Grieve, 1998, "The formation of large impact structures and constraints on the nature of Siljan," in A. Boden and K. G. Eriksson, eds., Deep Drilling in Crystalline Bedrock, vol. 1 (New York: Springer-Verlag), 330.

"Eine Tiefenbohrung bis zu acht Kilometern kann in der Größenordnung von 25 Millionen Dollar (US) kosten. In vielen erfolgreichen Gebieten war es notwendig, mehrere Löcher zu bohren, bevor eine gute Produktion erreicht wurde. Das Öl- und Gas Geschäft verlangt ein hohes Eintrittsgeld, kann aber reich belohnt werden. Vielleicht muss in der ersten Runde eine Summe von 25 Millionen Dollar riskiert werden, und wenn die Indikationen gut sind, muss vielleicht eine weitere Summe von zwei oder drei Mal so viel investiert werden. Aber die zu erwartende Belohnung kann die Energieunabhängigkeit Schwedens für eine lange Zeit sein."

Mit echtem Enthusiasmus schloss ich damit meinen Vortrag vor dem schwedischen Staatsrat für Energie 1983 ab. Im Dezember 1985 genehmigte das schwedische Parlament das Projekt, im Siljan-Meteoritenkrater bis zu einer Tiefe von mindestens 5 Kilometern zu bohren. Das Projekt sollte vom Schwedischen Amt für Energieversorgung (einer von der Regierung kontrollierten Energiebehörde) geleitet werden, wobei zusätzliche Mittel von schwedischen Investoren und dem U.S. Gas Research Institute beigesteuert wurden. Das Gas Research Institute mit Sitz in Chicago war nicht so sehr am kommerziellen Erfolg des Unternehmens interessiert, sondern an den wissenschaftlichen Erkenntnissen, die diese unkonventionelle Bohrung liefern würde.

Man wählte eine Stelle im Inneren des Siljanringes, um sicher zu gehen, dass ein eventuell gefundenes Öl nicht von Skeptikern als Versickerung aus der dünnen Schicht von Kalk- und Sandsteinen aus dem Paläozoikum, die den Krater umgibt, erklärt werden konnte (diese Schicht war ohnehin nirgends tiefer als 300 Meter). Erhebliche aktive Ölaustritte sind in Steinbrüchen innerhalb dieser sedimentären Region zu sehen, aber Kohlenwasserstoffgasaustritte sind in der gesamten Einschlagstruktur selbst umfangreich und treten aus reinem Eruptivgestein aus. Zahlreiche Wasserbrunnen unterstützen sogar eine Flamme (Abbildung 6.3).

Die Bohrungen begannen im Juni 1986 und wurden bis Juni 1990 fortgesetzt, als technische Probleme in der Bohrung weitere Bohrungen unmöglich machten, ohne einen sehr beträchtlichen Einsatz zusätzlicher Mittel, um einen neuen Ast der Bohrung zu bohren. Dennoch zeigten die Ergebnisse, dass Kohlenwasserstoffgase von Methan bis Pentan - sowie leichte, weitgehend wasserstoffgesättigte Öle - tatsächlich tief im Granitgestein vorhanden sind.[2]

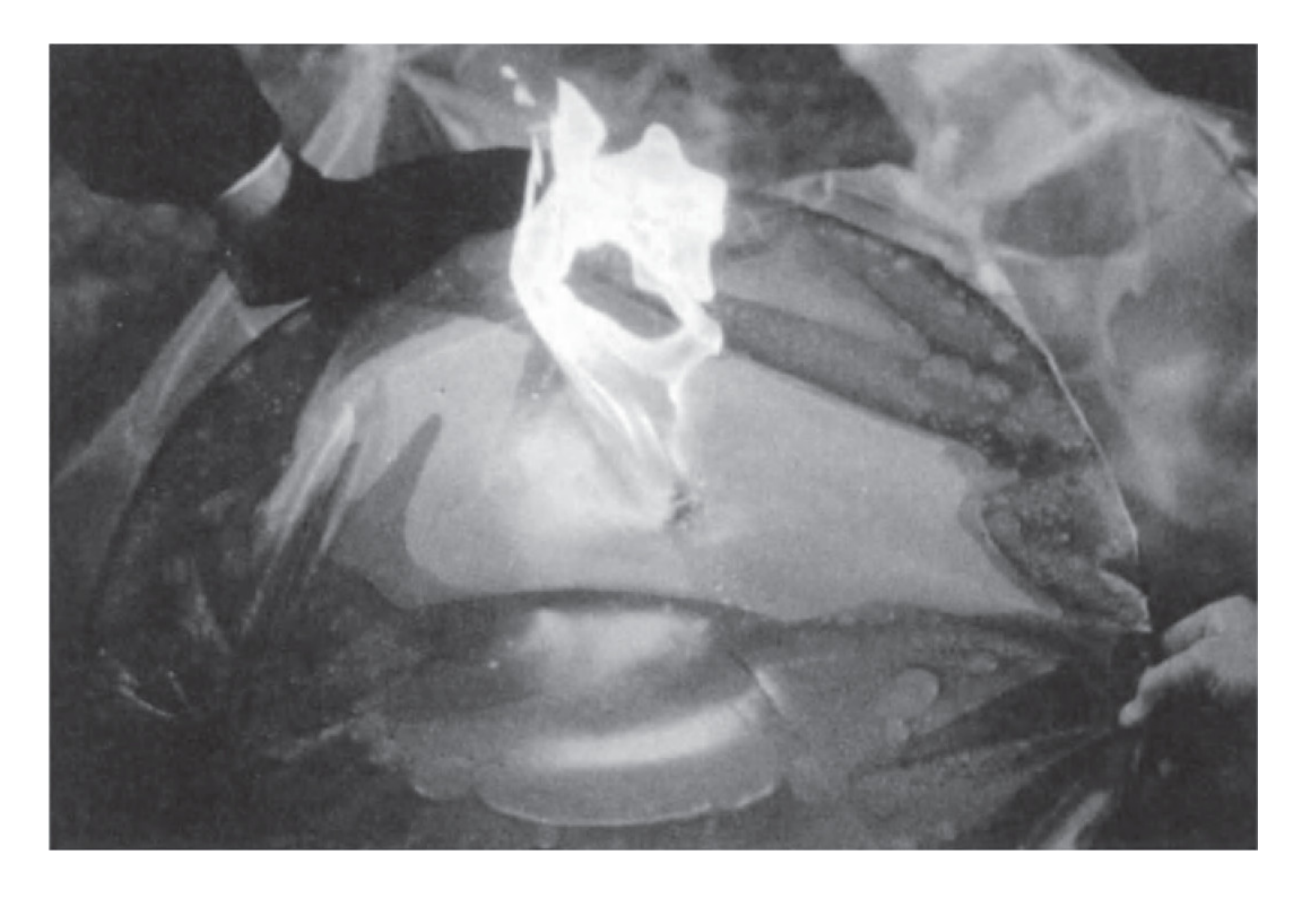


Abbildung 6.3
Flamme unterstützt durch Gasemissionen über einer Wasserquelle im Siljanring. Methanemissionen sind an einigen Stellen im Siljanring in Schweden stark genug, um eine Flamme zu erzeugen. Für diese Aufnahme deckte ich einen Wasserbrunnen für einige Minuten mit einer Plastikfolie ab, stach dann mit einer Nadel in die Folie und legte ein Streichholz über das Loch. Eine Flamme schoss 30 bis 40 Zentimeter hoch und ging dann auf 10 Zentimeter zurück. Ich brach das Experiment 10 Minuten später ab, als der Kunststoff zu schmelzen begann. Ein Video, das mir während meines Aufenthalts in der Region gezeigt wurde, zeigte eine 40 bis 50 cm lange Flamme, die aus dem laufenden Wasserhahn in der Küche eines örtlichen Bauernhauses aufstieg.

Vier Zweige des Bohrlochs wurden unterhalb von 5 Kilometern gebohrt (Abbildung 6.4), wobei der tiefste eine vertikale Tiefe von etwa 6,7 Kilometern erreichte. Wir bohrten mit einer Bohrspülung auf Wasserbasis, um das Bohrloch nicht mit eingeführten Ölen zu verunreinigen, und erhielten gute Messungen von Wasserstoff, Helium, Methan und den anderen Kohlenwasserstoffgasen bis hin zu Pentan (C_5H_{12}). Bei den Schwankungen mit der Tiefe gab es eine klare Korrelation aller Gase untereinander, einschließlich Helium, ein Ergebnis, das die Möglichkeit ausschloss, dass sie in irgendeiner Weise auf von oben eingebrachte Bohrzusätze zurückzuführen waren. Generell nahmen die in der Bohrspülung aufgewirbelten Mengen mit zunehmender Tiefe zu - ein deutliches Zeichen dafür, dass die Kohlenwasserstoffquelle in größerer Tiefe liegt. All diese Ergebnisse bestätigten die abiogene Theorie der Erdölbildung und unterstützten meine Ansicht, dass immer noch enorme Mengen an Kohlenwasserstoffen aus einer Urquelle in der tiefen Kruste und dem oberen Erdmantel nach oben strömten. Eine höchst willkommene Überraschung, die sich an diese Ergebnisse anschloss, war unsere Begegnung mit einer riesigen Menge eines konzentrierten, sehr feinkörnigen Untergrunds von großer Bedeutung - dessen Entdeckung, wie es in der Wissenschaft manchmal geschieht, nur durch ein Missgeschick zustande kam.



Abbildung 6.4
Standort des Bohrprojekts im Siljanring.

Magnetit und mikrobiologische Geologie

Im Juni 1987, nur ein Jahr nach Beginn der Arbeiten, kam es zu einer höchst bemerkenswerten Abfolge von Ereignissen. Infolge einer Bohrpanne blieb der Bohrmeißel in einer Tiefe von 6 Kilometern für einen Zeitraum von zehn Tagen stecken. Während des Stillstandes wurde die Zirkulation der Bohrspülung nicht aufrechterhalten, so dass Flüssigkeiten aus der Umgebung von unten in das Rohr eindringen konnten. Als das Bohrgestänge schließlich befreit und an die Oberfläche gebracht wurde, waren die untersten 10 Meter durch eine sehr steife Paste fest verschlossen. Selbst die an der Oberfläche zur Verfügung stehenden Hochdruckpumpen konnten sie nicht herausblasen, und das Rohr musste mechanisch gereinigt werden. Das Material war schwarz, hatte die Konsistenz von Knetmasse und verströmte einen starken und unangenehmen Geruch.

Eine Probe des Materials wurde zur Analyse an das norwegische petrochemische Labor, Geolab Nor, geschickt. Die Laboranalyse ergab, dass es sich bei dem Öl der schwarzen Paste hauptsächlich um ein leichtes Öl mit kleineren Mengen schwerer Moleküle handelt, deren genaue Identität nicht festgestellt werden konnte. Geolab Nor stellte fest, dass dieses Öl keine Ähnlichkeit mit einem der Bohrhilfsmittel aufwies, die ihnen zum Vergleich vorgelegt worden waren.

Bei einem Besuch vor Ort drei Monate später konnte ich mir selbst eine Probe besorgen. Obwohl etwa 60 Kilogramm dieser dicken, schwarzen Paste aus den Rohren gebohrt worden waren, als sie schließlich nach oben gebracht wurden, war fast alles davon weggeworfen worden, vermutlich, weil es als uninteressantes, übelriechendes Ärgernis ohne kommerziellen Wert beurteilt wurde. Dennoch war es von außerordentlichem wissenschaftlichem Wert. Leider befand sich alles, was von einer konservierten Probe übrig blieb, in einem kleinen Plastikbeutel.

Der Chemiker vor Ort erzählte mir, dass der Geruch des verstopften Rohres, als es hochgezogen wurde, ihm anzeigte, dass es sich bei dem Schlamm um ein bakterielles Produkt handelte und dass es sich daher um etwas handeln musste, das von oben hineingefallen war. So verunreinigt, hätte der Schlamm keinen wissenschaftlichen Wert gehabt. Wie 60 Kilogramm einer gleichmäßigen schwarzen Paste von oben hineingefallen sein sollten, wurde nicht erklärt, ebenso wenig wie der Grund, warum sie Öl als Bindemittel haben sollte und nicht Wasser, das zu dieser Zeit die Bohrflüssigkeit war. Alles bis auf die kleine Probe in seiner Hand war in einen Graben geschaufelt und mit Erde bedeckt worden, um den Gestank loszuwerden. Die kleine Probe, die er zurückbehalten hatte, befand sich in einem gewöhnlichen Polyethylenbeutel. Da Polyethylen Öle aufsaugt und weiterleitet, wären die leichteren Kohlenwasserstoffe leicht entwichen. Das Ergebnis dieser unzureichenden Konservierung war, dass das Material nun ziemlich steif und nicht mehr so geschmeidig war, wie es anfangs beschrieben worden war.

So kam es, dass ich direkt von Schweden aus zu einem Kurzurlaub bei einem Freund auf der spanischen Mittelmeerinsel Mallorca fahren sollte. Ich kam dort an einem Wochenende an, und für eineinhalb Tage hatte ich keinen Zugang zu allem, was man in einem Baumarkt oder einer Drogerie kaufen könnte. Dennoch war ich fasziniert von dem schwarzen Material und konnte nicht so lange warten, bis ich es analysieren konnte. Also beschloss ich, ein kleines Chemie- Experiment in der Spüle (und im Küchenschrank) zu wagen.

Zuerst durchsuchte ich die Wohnung nach allem, was als Öllösungsmittel dienen könnte, aber es gab kein Farblösungsmittel, keinen Nagellackentferner oder etwas in der Art. Es gab jedoch Magnete im Haus - die magnetischen Verschlüsse von Schranktüren -, die mir einen Hinweis auf eine der Eigenschaften der Substanz geben könnten. Ich schraubte einen ab und stellte fest, dass der Schlamm stark magnetisch war. Dann gab ich eine kleine Menge des Materials in heißes Wasser und Küchenreiniger, und tatsächlich, nach einiger Anstrengung löste es sich auf. Die so entstandene verdünnte Flüssigkeit war fast durchsichtig; sie hatte nur ein leicht graues, trübes Aussehen. Offensichtlich enthielt sie Partikel, aber sie waren sehr klein. Ich gab einen Tropfen dieser Flüssigkeit auf ein Stück Alufolie, und in der großen Verdünnung wirkte sie völlig transparent. Dann hielt ich den Türklinkenmagneten darunter, und augenblicklich erschienen die beiden Linien der Magnetpole als deutliche schwarze Linien auf der Folie. Ähnlich verhielt es sich, als ich den Magneten an eine Seite eines mit dieser Flüssigkeit gefüllten Glases hielt, und sofort entstand ein großer schwarzer Fleck an der Wand des Glases. Weitere Experimente zeigten, dass dieses Material hauptsächlich aus sehr kleinen magnetischen Körnern und einem Öl bestand, das mit Küchenreiniger in Wasser aufgelöst werden konnte.

Als Nächstes legte ich eine Probe der ursprünglichen Paste über Nacht in den Gefrierschrank und beobachtete, dass sie danach viel steifer war, aber sie war nicht völlig hart und ließ sich immer noch zerdrücken und verformen. Das bedeutete, dass sie extrem wenig Wasser enthielt, das natürlich gefroren wäre. Obwohl also das Bohrsystem zum Zeitpunkt des Fundes des Materials vollständig mit Wasser gefüllt war, muss dieser Schlamm in einer ölbasierten Flüssigkeit in einer ausreichenden Konzentration eingetreten sein, um das Wasser zu ersetzen und sich nicht mit diesem zu vermischen.

Ich schüttete auch einige Tropfen dieses gelösten Materials auf Küchenpapiertücher, um zu sehen, ob die Tücher als grober Chromatograph dienen würden, mit dem man verschiedene Komponenten einer Flüssigkeit aussortiert, abhängig von der Masse und damit von der Geschwindigkeit, mit der sie in einem porösen Material diffundieren. Es bildete sich ein schwarzer Fleck von bestimmter Größe, der von einem viel größeren, aber ebenfalls klar definierten feuchten Bereich umgeben war. Dies bedeutete, dass die Partikelgröße klein genug war, um durch Diffusion im Papier transportiert zu werden. Als ich außerdem einen Klumpen des Materials mit einem Messer anschnitt, war die Schnittfläche glänzend. Daraus konnte ich schließen, dass die Partikelgröße nicht viel größer als die Wellenlänge des Lichts sein konnte.

Was also war das alles? Das einzige schwarze und magnetische Material, von dem ich wusste, dass es in der Natur vorkommt, war Magnetit (Fe_3O_4). Was ich also entdeckt zu haben schien, war ungewöhnlich feinkörniges Magnetit, jedoch in einem Größenbereich, der groß genug war, um ferromagnetisch zu sein. Partikel von Magnetit, die kleiner als etwa 3×10^{-6} Zentimeter sind, würden das kooperative Phänomen des Ferromagnetismus nicht unterstützen. Der starke Geruch, der von dem Schlamm ausgeht, könnte der Geruch eines Schweröls zusammen mit verrottendem biologischen Material sein. Eine tote Ratte auf dem Garagenboden wäre die beste Beschreibung, die ich geben könnte.

Feinkörniges Magnetit war sicherlich ein Hauptbestandteil des schwarzen Schlamms, aber warum war es überhaupt da? Wie hatte sich Magnetit in einer Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit konzentriert, die sich durch Poren und Risse des Granitgesteins so weit bewe-

gen konnte, dass sie in ein unbeaufsichtigtes Bohrloch eindringen konnte? Und was könnte eine tote Ratte damit zu tun haben?

Ich ließ viele Laboranalysen des Schlamms durchführen, die die feinkörnige Beschaffenheit des Magnetits zeigten, die von Bruchteilen eines Mikrometers bis zu wenigen Mikrometern reichte.[3] Die in zwei Laboren[4] durchgeführte Mossbauer-Spektroskopie zeigte das Vorhandensein von Zink in einer Größenordnung von etwa 2 Prozent, womit Zink das zweithäufigste Metall nach Eisen war. Da das Zink im Kristallgitter des Magnetits enthalten war (und weil Zink kein Bestandteil der Bohrgeräte, der Bohrspülung oder der Zusatzstoffe war), war klar, dass Zink während der Bildung dieser Kristalle vorhanden gewesen sein musste. Ich erinnerte mich auch daran, dass es in der Nähe des Siljanringes tatsächlich eine kommerzielle Zink- und Bleimine gegeben hatte. Diese Befunde bestätigten, dass der Schlamm aus dem Tiefengestein stammte und nicht eine Fabrikation von Bohrspülungen war, die von der Oberfläche aus injiziert wurden.

Eine Neutronenaktivierungsanalyse[5] ergab ebenfalls einen ähnlich hohen Zinkgehalt sowie eine Reihe anderer Anomalien. Bei dieser Untersuchung wurden die im Schlamm enthaltenen Magnetitkörner mit dem gröberen Magnetit (Millimeter- statt Mikrongröße) verglichen, das im Bohrklein in derselben Tiefe enthalten war. Zusätzlich zu einem Größenunterschied zeigten die beiden Magnetitquellen zahlreiche andere große Unterschiede im Spurenelementgehalt auf, viele um Faktoren von mehr als 10. Die in den Schlämmen enthaltenen Magnetitmengen waren auch sehr viel größer als die Magnetitkonzentration im umgebenden Granit. Sowohl in der Menge als auch in der Größe und der Chemie unterschieden sich die Magnetitkörner im Schlamm deutlich von denen in der Gesteinsumgebung. Dies deutete für mich darauf hin, dass sich die Quelle des Magnetits oder seines Vorläufereisenmoleküls in einer größeren Tiefe befand und dass die ausgelaugten Moleküle oder Körner von einer aufsteigenden Kohlenwasserstoffflüssigkeit nach oben getragen wurden.

Ein weiterer wichtiger Laborbefund war der ungewöhnlich hohe Iridium-Gehalt im Magnetit des Schlamms, der sich als 250-mal höher erwies als in den größeren Magnetit-Körnern, die ein üblicher Bestandteil des Granits waren und die aus Granitabschlägen aus der gleichen Tiefe ausgewählt wurden. Die Forscher erklärten, dass dies die höchsten Iridium-Werte waren, die sie in etwas anderem als Ölbohrungen gesehen hatten. Nicht nur dieses schwarze ölige Material, sondern auch Ölschiefer in den flachen und alten Sedimentgesteinen, die die Ringe umgeben, waren zuvor mit Iridium angereichert worden. Aus der Tiefe der Erde müssen Flüssigkeiten aufgestiegen sein, die Iridiumverbindungen mitbrachten, die sich dann in anderen ölgetränkten Mineralien nachweisen ließen.

Diese Schlussfolgerung beruht auf den gängigen Erkenntnissen der Geowissenschaften. Iridium ist ein sehr schweres Metall. Während der frühen Differenzierungsphasen der Erde wanderten Iridium und andere Schwermetalle (darunter reichlich Eisen und Nickel) in Richtung Erdinneres und bildeten den metallischen Kern der Erde. Ungewöhnlich hohe Konzentrationen von Iridium, die irgendwo in oder auf der Kruste gefunden wurden, können nur aus einer von zwei möglichen Quellen stammen. Das Iridium könnte durch eine aus den Tiefen der Erde aufsteigende Flüssigkeit transportiert worden sein, oder es könnte von einem Meteoriten geliefert worden sein. Ersteres scheint wahrscheinlicher, da Iridium stark mit Ölquellen verbunden ist.

Eine weitere Untersuchung wurde von meinem Freund Robert Hefner, einem Tiefgasunternehmer, initiiert. Die Untersuchung wurde von Paul Philp, an der Universität von Oklahoma durchgeführt. Philp ist ein Spezialist für die Untersuchung von biologischen Molekülen in Erdöl, und er analysierte das Öl im schwarzen Schlamm auf solche Moleküle. Zunächst kam er zu dem Schluss, dass es sich bei dem Öl nicht um irgendeine Form von Verunreinigung handelte, die durch den Bohrprozess oder durch irgendwelche Zusätze eingebracht wurde. Es war ein natürliches Material. Zweitens sah er, dass eine Reihe einer Klasse von Molekülen, die Sterane genannt wurden, die gleiche Menge und in den gleichen Anteilen waren, wie er sie zuvor in den Ölsickern an der Oberfläche des Siljanringes und im Ölschiefer, der in den flachen Sedimenten um den Ring herum existierte, entdeckt hatte. Die Ansicht, dass der Ölschiefer in den Sedimenten das Ausgangsmaterial für die flüssigen Ölaustritte gewesen sei, wäre die gängige Annahme in der Erdölgeologie. Doch nun fand er dieselben Fingerabdrücke in dem Öl, das aus einer Tiefe von 5 Kilometern heraufgeholt wurde. "Wie es da runter gekommen ist, weiß ich nicht", war seine Antwort auf diesen seltsamen Befund. Meine Antwort war natürlich, dass alle drei Arten von Öl aus der Tiefe nach oben gelangt waren.[6]

Philp hatte auch ein Molekül als charakteristisch für ein Produkt eines Meeresorganismus identifiziert, und er hielt dies für einen weiteren Beweis für eine Abwärtswanderung des in geringer Tiefe produzierten Öls. Später stellte ich jedoch fest, dass dasselbe Molekül ein übliches Produkt von methanoxidierenden Bakterien war, die in der Biosphäre an der Oberfläche selten, aber, wie ich glaube, in der Tiefe reichlich vorhanden sind.

Die bemerkenswerte jüngste Analyse des Siljan-Schlamms ergab die wahrscheinliche Herkunft des gesamten Magnetits, was auch seine Konzentration und den Gestank des Schlamms erklären würde. Die Antwort: Das Leben war verantwortlich. Ich hatte vermutet, dass der feinkörnige Magnetit ein bakterielles Produkt ist, obwohl die Temperaturen in den Tiefen, in denen der Magnetit gefunden wurde, zwischen 600 und 80 Grad Celsius lagen.

Magnetit ist eine der Substanzen, die zurückbleiben, wenn höher oxidiertes Eisen von Bakterien reduziert wird. (Magnetit, Fe_3O_4, enthält 16 Sauerstoffatome pro 12 Eisenatome, während Eisen(III)-Eisen, Fe_2O_3, 18 Sauerstoffatome pro 12 Eisenatome enthält, Magnetit ist also die reduzierte Form.) Die Mikroben spülten also Sauerstoffatome aus dem Eisen ab, um die Kohlenwasserstoffe zu verbrennen, die an ihnen vorbei strömten. Magnetit war das Nebenprodukt dieser Stoffwechselaktivität.

Es schien also notwendig, einen Versuch zu unternehmen, Mikroben aus diesen Tiefen zu kultivieren, und ich fragte das Schwedische Nationale Bakteriologische Laboratorium in Stockholm, ob sie es versuchen würden. Dr. U. Szewzyk zeigte sich sehr interessiert, und er und sein Team beschlossen, den Versuch zu unternehmen. Sie entwarfen ein Probenahmegerät an einer Drahtleitung, mit vielen Kapseln in verschiedenen Tiefen. Das Gerät wurde zu einem Zeitpunkt eingeführt, als die Bohrung gestoppt war und Wasser aus der Formation das Loch füllte. Das Ergebnis war auffallend positiv.[7] Mindestens zwei bisher unbekannte Bakterienstämme wurden erfolgreich kultiviert, beide in einem Temperaturbereich, der dem in der Entnahmetiefe ähnlich war, und beide unter anaeroben Bedingungen, die ebenfalls denen an den Probenorten ähnelten. Obwohl Acetat und Zucker als Nährstoffe zur Unterstützung des Bakterienwachstums verwendet wurden (diese Substanzen werden üblicherweise für Bakterienkulturen verwendet), und nicht Kohlenwasserstoffe und Eisenoxide, war die Tatsache, dass überhaupt Leben vorhanden war und dass Mag-

netit in großer Menge vorhanden war, signifikant. Aufgrund des Charakters der Nährstoffe waren die kultivierten Mikroben etwas von der wahrscheinlich ersten Stufe der Nahrungskette entfernt; vermutlich ernährten sie sich von den Mikroben, die näher an der ersten Stufe waren. Dennoch zeigten sie das Vorhandensein mindestens eines Knotens der Ökologie in der tiefen Biosphäre des Siljanringes.[8]

Thermophile Mikroorganismen waren in der schwedischen Bohrung tatsächlich in der Tiefe vorhanden, und es ist anzunehmen, dass sie für die Produktion der großen Mengen Magnetit verantwortlich sind, die in das Bohrgestänge eingedrungen waren. Entsprechend müssen große Mengen an Kohlenwasserstoffen bei der Reduktion von Eisen(III)-Eisen zu Magnetit verbraucht worden sein, der niedrigsten Oxidationsstufe von Eisen, die durch Reduktion mit Kohlenwasserstoffen erreicht werden kann. Der konzentrierte Magnetit war jedoch weit mehr als eine isolierte Kuriosität. Die gleiche Art von feinkörnigem Magnetit wurde in einem sehr ähnlichen Öl in einem zweiten Bohrloch, das unser schwedisches Team kurz nach dem ersten Bohrloch niedergebracht hatte, in großer Menge gefunden. Der zweite Fundort lag im Zentrum des Siljanringes, 11 Kilometer von der ersten Bohrung entfernt. Dieser zweite Fund lieferte die eindeutige Bestätigung, dass es sich bei der früheren Entdeckung nicht um eine lokale Anomalie handelte und dass sie nicht durch Bohrhilfsmittel erzeugt worden war (wie einige Kritiker behauptet hatten), denn bei diesem Loch war Wasser die Hauptbohrflüssigkeit gewesen, und es waren keine Öle in die Nähe des Lochs gelangt, die dem Erdöl auch nur im Entferntesten ähnelten.

Der gesamte Siljanring, ein Gebiet von etwa 1600 Quadratkilometern, zeigt eine starke positive magnetische Anomalie, die auf dem kreisförmigen Merkmal zentriert ist. Magnetit war das einzige magnetische Mineral, das wir angetroffen hatten, und man konnte die Mengen berechnen, die die Anomalie erklären würden. Die Ergebnisse waren vergleichbar mit den Mengen in anderen schwedischen Magnetitlagerstätten, die lange Zeit als beste Quelle für Eisenerz zur Stahlproduktion abgebaut wurden. Dies deutet darauf hin, dass ein ähnlicher Magnetitschlamm, der durch dieselbe Art von biologischen und geologischen Prozessen erzeugt wurde, die in der Tiefe in unseren Siljan-Bohrungen zu beobachten waren, Schwedens zahlreiche und kommerziell wertvolle Magnetit-Eisenerzlagerstätten hervorgebracht haben könnte, aus denen die äußerst erfolgreiche Stahlindustrie des Landes aufgebaut wurde. Wenn mikrobiell hergestellter Magnetit tatsächlich der Ursprung aller schwedischen Magnetitvorkommen war, wäre dies ein Fall für mikrobielle Geologie im großen Stil.

Der Ölschlamm, der aus einer Tiefe von 6 Kilometern in einer rein granitischen und eruptiven Region Schwedens ist ein überzeugender Beweis für das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen in einer Tiefe, die die biogene Theorie nicht erklären kann. Der Schlamm lieferte somit eine starke Bestätigung der Erdgastheorie. Die Kultivierungsexperimente wiederum lieferten verlockende Hinweise auf das Vorhandensein von mikrobiellem Leben in der Tiefe. Der Nachweis, dass ungewöhnliche Konzentrationen von Magnetit mit Kohlenwasserstoffen korrelieren, ist nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch für die Erdölexploration von Bedeutung. Es wird heute allgemein angenommen, dass positive magnetische Anomalien, die leicht geortet werden können, tatsächlich Hinweise auf das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen sind.[9]

Die Geschichte der Erdölentdeckung in der Siljan-Region hat noch eine Fortsetzung gefunden. Im April 1990 wurde in der ersten Bohrung eine Bohrlochpumpe installiert, um zu sehen, was hochgepumpt werden konnte (ein übliches Verfahren in der Erdölindustrie).

Alle zuvor entnommenen Proben stammten von Flüssigkeiten und Schlämmen, die sich in der Bohrausrüstung verfangen hatten. Dieser Pumpvorgang förderte etwa 12 Tonnen Rohöl zutage, das vom Dänischen Geologischen Institut als "wie normales Rohöl aussehend" beschrieben wurde.

Zusammen mit dem Öl kamen 15 Tonnen feinkörniges Magnetit. Die Kohlenwasserstoffkonzentrationen wurden in den Gesteinsschnitten des zweiten Bohrlochs festgestellt, die alle 5 Fuß in der Tiefe beprobt wurden. Die extrem hohen Werte stammten jedes Mal aus Proben, bei denen der Bohrer ein vulkanisches Intrusivgestein, Dolerit, durchquert hatte, das im Granit der Gegend bekannt ist. Das vulkanische Intrusivgestein war mit Sicherheit aus tieferen Schichten aufgestiegen, was darauf hindeutet, dass diese Intrusionen die Leitung für die Kohlenwasserstoffe waren. Eine stärkere Bestätigung für den tiefen Ursprung der Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten hätte ich mir nicht wünschen können (Abbildung 6.5).

Dank der Pumpergebnisse von 1990 konnten die in der Tiefe gefundenen Mengen an Öl und Magnetitpaste nicht mehr als "Spurenmengen" abgetan werden, wie sie zuvor in mehreren wissenschaftlichen Fachzeitschriften beschrieben worden waren. Dennoch wollte keine größere Zeitschrift diese auffälligen Ergebnisse veröffentlichen, und ich erhielt Antworten von Gutachtern, die diese Beobachtungen als völlig unglaublich bezeichneten und behaupteten, dass sie von einem anderen Team wiederholt werden müssten, bevor sie zur Veröffentlichung akzeptiert werden könnten. Unsere Einladungen an die großen Erdölforschungsorganisationen, Delegierte zum Standort zu schicken und unsere Aktionen zu beobachten, blieben unbeachtet.

Vierundachtzig Fässer Öl sind aussagekräftig, vor allem, wenn sie an einem Ort gefunden werden, für den es nach herkömmlicher Auffassung keine rationale Erklärung für einen einzigen Tropfen Öl geben kann. Die Theorie vom abiogenen Ursprung des Erdöls war damit bestätigt worden. Dr. Peter N. Kropotkin, ein angesehener Erdölgeologe in der ehemaligen Sowjetunion, schrieb in einer Ausgabe von *The History of Science*: "Die Entdeckung von Erdöl, tief im Baltischen Schild, kann als entscheidender Faktor in der hundert Jahre alten Debatte über den biogenen oder abiogenen Ursprung von Erdöl angesehen werden. Diese Entdeckung wurde in Tiefbohrungen gemacht, die im zentralen Teil des kristallinen Baltischen Schildes auf Initiative von T. Gold durchgeführt wurden.[10]

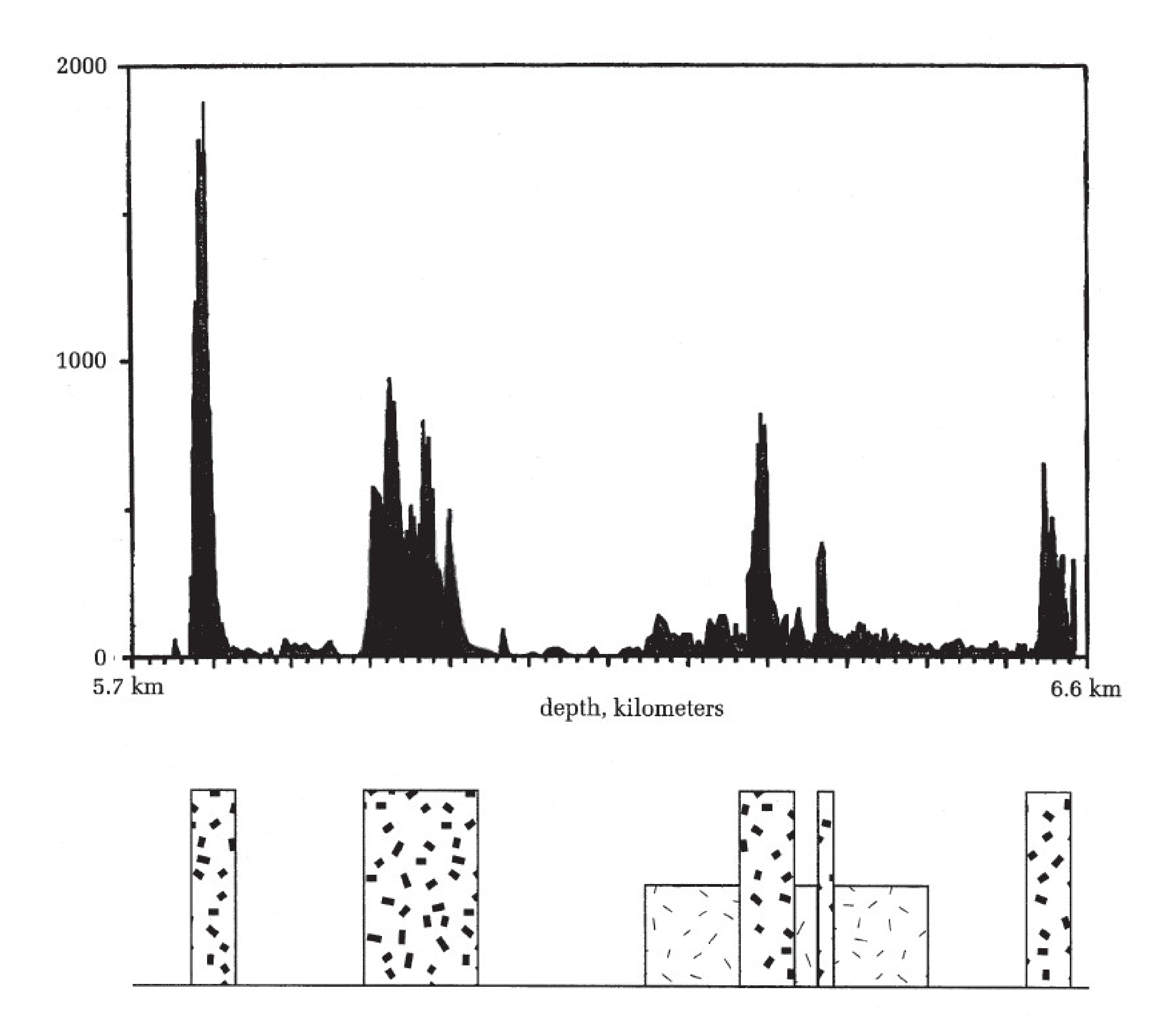


Abbildung 6.5
Methankonzentrationen in Gesteinsschnittkörnern zwischen einer Tiefe von 5,7 km und 6,6 km. Die obere Abbildung zeigt das aus dem Inneren der Körner extrahierte Methan. Es wurde ein einheitliches Extraktionsverfahren verwendet, so dass die relativen Werte korrekt sind, auch wenn die absoluten Werte nicht genau definiert werden können. Die untere Abbildung zeigt, auf der gleichen Tiefenskala wie oben, das Vorkommen von vulkanischem Intrusivgestein, Dolerit. Die hohen Säulen stehen für reine Doleritkörner, die niedrigen für eine Mischung aus Granit- und Doleritkörnern. Der Rest der Linie stellt reine Granitkörner dar. Die Übereinstimmung der hohen Methanwerte mit Dolerit-Intrusionen ist offensichtlich.

Dennoch konnte in keiner der beiden Bohrungen in der Siljan-Region eine kommerzielle Fördermenge festgestellt werden. Das lag aber nicht daran, dass das Angebot dürftig war. Vielmehr verstopfte die Magnetitpaste immer kurz nach dem Beginn eines Flusses die Risse im Gestein, die in das Bohrloch führten. (Wären die technischen Mittel, das Geld und das Interesse vorhanden gewesen, einen weiteren, wesentlich tieferen Ast des Bohrlochs zu bohren, wäre die eigentliche Quelle der Kohlenwasserstoffe vielleicht in kommerziellen Mengen verfügbar geworden. Aber weitere Bohrungen wären für die Investoren ein Glücksspiel gewesen, so dass sie sich entschlossen, das Projekt zu diesem Zeit-

punkt zu beenden. Wie viele andere Bohrungen im Erdölgeschäft hat sich das Projekt nie als kommerziell erwiesen, aber es war dennoch ein wissenschaftlicher Erfolg).

Was für eine grausame und ironische Wendung des Schicksals! Ein *kommerzieller* Erfolg war nicht möglich, weil genau die Substanz im Überfluss vorhanden war, die diesem Projekt seinen *wissenschaftlichen* Erfolg bescherte. Der Magnetitschlamm machte eine nachhaltige Erdölförderung unmöglich, aber er gab der Theorie der tiefen heißen Biosphäre eine wichtige Stütze.

Bei dem schwedischen Bohrprojekt war mir ein Blick auf die tiefe heiße Biosphäre gewährt worden. Ich hielt es nun für durchaus möglich, dass die Mikrobiologie im Untergrund so weit verbreitet war, dass jede ölführende Region einer biologischen Veränderung unterworfen war, bis hinunter zu den tiefsten Bohrlöchern, aus denen Öl gefördert wurde. Da die Temperatur der Erde mit der Tiefe zunimmt, müssen die beteiligten mikrobiellen Lebensformen hyperthermophil sein und bei Temperaturen von bis zu 120°C, möglicherweise sogar bis zu 150°C, leben. Und wie in Kapitel 5 erläutert, kam ich bald zu der Vermutung, dass die Menge dieser Lebensformen, bezogen auf Masse oder Volumen, mindestens vergleichbar mit der Menge allen uns bekannten Oberflächenlebens sein könnte. Die Theorie der tiefen heißen Biosphäre würde das Paradoxon der scheinbar widersprüchlichen Fakten lösen, das die Erdölgeologie lange Zeit in zwei Lager gespalten und die Neubetrachtung des Ursprungs des Erdöls für viele Jahrzehnte zum Stillstand gebracht hatte. Könnte diese neue Sichtweise des Lebens *in* der Erde auch ein Umdenken im Rest der Geologie erforderlich machen?

Kapitel 7

Erweiterung der Theorie

Wenn wir erst einmal die Existenz und die Unermesslichkeit der Kohlenwasserstoffquellen, die aus dem Erdmantel aufsteigen, verstanden haben, können wir eine Reihe von Themen in der Geologie gewinnbringend neu überdenken. Einige dieser Themen wurden lange Zeit als geologische Rätsel betrachtet; andere schienen geklärt zu sein, erfordern aber meiner Meinung nach einen neuen Blick.

In diesem Kapitel werde ich zwei Erweiterungen der Gas-Tiefen-Theorie untersuchen. Die erste ist eine Interpretation der Entstehung von Diamanten in großer Tiefe innerhalb der Erde. In der zweiten stelle ich eine neue Sichtweise vor, wie einige Metallvorkommen entstanden sind und sich in Clustern in der äußeren Kruste konzentriert haben. Da beide Themen hartnäckige Probleme in der Geologie sind, dürften die hier angebotenen Spekulationen besonderes Interesse wecken. In Kapitel 8 wird dann eine dritte, in den Geowissenschaften sehr umstrittene Erweiterung der Tiefsee-Gastheorie verfolgt: eine Erklärung des Erdbebenprozesses.

Die Chemie in großer Tiefe ist wahrscheinlich ganz anders als die uns vertraute Niederdruckchemie. In einer Tiefe von 150 Kilometern beispielsweise würde der Druck 40 Kilobar betragen, was dem 40.000-fachen unseres Atmosphärendrucks entspricht. Sehr viele verschiedene Moleküle werden durch diesen Außendruck zusammengehalten - Moleküle, die wir an der Oberfläche nie gesehen haben. In der Tat beginnt das Konzept der Moleküle bei einem Druck, der mit den Kräften innerhalb eines Moleküls vergleichbar ist, die es zusammenhalten oder auseinanderbrechen lassen, zu zerbrechen. Wir haben vielleicht einige der Abbauprodukte dieser unbekannten Moleküle oder kristallographischen Formen an der Oberfläche gesehen, aber wir können sie nicht herstellen oder die Vorläufer untersuchen. Dennoch könnten sie in der Tiefe eine wichtige Rolle spielen.

Die Durchführung von Experimenten bei einem Druck von 40 Kilo-Bar oder mehr und bei den hohen Temperaturen, die in der Tiefe auftreten, würde extrem teure Geräte erfordern. Außerdem sind thermodynamische Berechnungen zum Verständnis der Geheimnisse der Tiefenchemie komplex und nur sehr schwer explorativ durchzuführen. Wenn man weiß, wonach man sucht, kann man einige Informationen erhalten. Aber als Mittel zur Bestimmung unbekannter Moleküle sind Berechnungen an sich nicht sehr geeignet. Die Umstände, unter denen die Atome der aus dieser weitgehend unbekannten Chemie stammenden Moleküle gefunden werden, können ein gewisses Licht auf die chemischen Prozesse werfen, die daran beteiligt waren, zumal es bei den Vorkommen bestimmter Metallminerale viele eindeutige regionale Korrelationen und bei den Kohlenstoffvorkommen Assoziationen mit Merkmalen in der Kruste gibt.

Welches sind die Prozesse in der Erde, die bestimmte Materialien an genau definierten Stellen in der Kruste konzentriert haben? Man hätte meinen können, dass die Tendenzen in die andere Richtung gehen - dass die unterirdischen Erdprozesse die Dinge willkürlich durcheinander bringen würden. Aber warum sollten wir dann jemals einen Goldklumpen oder einen Diamanten aus sehr reinem Kohlenstoff finden? Oder warum würden wir Orte finden, an denen bestimmte Metalle in einem Gestein um den Faktor von einer Million oder mehr im Vergleich zu anderen Gesteinen konzentriert sind?

Irgendwelche mächtigen Konzentrationsprozesse müssen in der Erde am Werk sein, angetrieben durch die innere Energie, die die Erde besitzt. Eine solche Energiequelle ist das Gravitationsfeld, das schwere Substanzen dazu bringt schwere Substanzen sinken und leichte Substanzen steigen zu lassen. Wir können die Bildung eines Eisenkerns auf diese Weise verstehen, denn Eisen ist reichlich vorhanden und etwa doppelt so dicht wie das Gestein. Genauso leicht lässt sich das Ankommen von Wasser und anderen Fluiden an der Oberfläche verstehen, die weniger dicht sind als die meisten Gesteine.

Aber es gibt viele Konzentrationsprozesse, die durch die chemischen Eigenschaften einer Substanz definiert sind, nicht nur durch ihre Dichte. Es wird allgemein angenommen, dass in all diesen Fällen eine Flüssigkeit durch die Poren des Gesteins fließen muss und dass ihre chemischen Eigenschaften so beschaffen sein müssen, dass sie das spezifische Atom oder Molekül, das konzentriert werden soll, aus dem Gestein aufnimmt und im Fluss mitführt. Dann muss eine Änderung der Umstände - wie Druck, Temperatur oder ein chemischer Wirkstoff - die Menge der Substanz, die die Flüssigkeit transportieren kann, verringern, was zu einer Ablagerung der Substanz führt, die nun im Vergleich zu ihrer ursprünglichen Anwesenheit im Gestein hoch konzentriert ist. Alle Sortierprozesse erfordern Energie, und diese Energie muss zumindest teilweise aus der chemischen Energie stammen, die die Erde seit ihrer Entstehung besitzt.

Obwohl viele beobachtete Konzentrationen chemischer Komponenten durch solche Prozesse zufriedenstellend erklärt werden konnten, haben viele andere der Geologie lange Zeit große Rätsel aufgegeben. Es gibt nichts Interessanteres oder Wichtigeres in der Wissenschaft als die Beobachtungen, die wir nicht erklären können. Die Bildung von Diamanten und die Ablagerung bestimmter Metallerze gehören in diese Kategorie. Diesen beiden Rätseln wollen wir uns nun zuwenden.

Entstehung von Diamanten

Die Entdeckung von Kristallen aus reinem Kohlenstoff - Diamanten - auf und nahe der Erdoberfläche war völlig unerwartet. Es handelt sich nicht um Kristalle, die bei niedrigem Druck stabil und im Gleichgewicht sind, und aus diesem Grund können Diamanten nicht in der Nähe des Fundortes entstanden sein. Selbst wenn ein oberflächennaher Prozess Kohlenstoff zu hoher Reinheit hätte konzentrieren können, hätte dies zur Ablagerung von Graphit, der stabilen kristallographischen Form von Kohlenstoff in der Erdkruste, führen müssen. Diamant ist die Hochdruckform des Kohlenstoffs, aber der Druck, der nötig ist, um diesen stabilen Zustand zu erreichen, ist so immens, dass man kaum erwartet hätte, Proben an der Oberfläche zu finden. Nicht nur, dass sie sich hier nicht gebildet haben können, sie werden im Laufe der Zeit sogar zu Graphit (das schwarze Zeug in Ihrem Bleistift) zerfallen. Diamanten sind nicht ewig, aber wie sich herausstellt, sind sie es für lange genug.

Der Druck, der nötig ist, um den Bereich der Stabilität von Diamanten zu erreichen, beträgt etwa 40 Kilo-Bar, also das 40.000-fache unseres Atmosphärendrucks. Dies ist aus theoretischen Berechnungen bekannt und wurde in Hochdruckexperimenten bestätigt. Wir finden in der Natur keine Druckbehälter, die solchen Drücken standgehalten haben könnten. Die einzigen uns bekannten Stellen, an denen solche Drücke zu erwarten wären, liegen in einer Tiefe, in der das Überlagerungsgewicht des Gesteins diesen Druck ausgleichen würde. Die Erde ist nicht wie ein Dampfkessel gebaut, in dem die Zugfestigkeit des

Stahls einen hohen Druck aushält, sondern wie ein Haufen Schutt, der willkürlich zusammengewürfelt wurde und keine Zugfestigkeit besitzt. Diese fehlende Zugfestigkeit ermöglicht es uns, die minimale Tiefe zu berechnen, in der der für die Diamantbildung erforderliche Druck erreicht werden könnte, und das sind etwa 150 Kilometer - und damit im Erdmantel weit unterhalb der Kruste. Damit bleiben zwei Dinge zu erklären: wie die Diamanten an die Oberfläche kamen und warum sie die Hochdruckform an der Oberfläche beibehielten und nicht zu Graphit zerfielen.

Die entscheidende Entdeckung, die diese beiden Fragen beantwortete, wurde 1870 in der Nähe einer Stadt namens Kimberley in Südafrika gemacht. Dort wurden nicht nur Diamanten gefunden, sondern auch eine außergewöhnliche Besonderheit: eine steile, trichterförmige Vertiefung, die tief in das Gestein eindrang, sich von etwa 200 Metern an der Spitze auf wenige Meter in etwa 1 Kilometer Tiefe verengte und sich als Rohr bis über die Beobachtungstiefe hinaus fortsetzte. Mittlerweile wurden 10 solcher diamantführenden Trichter gefunden, die über den gesamten Globus verteilt sind. Sie enthalten etwas Mantelgestein, zusammen mit lokalem Füllmaterial, das hineingefallen ist. Diese Auffüllung und der Boden in der Nähe weisen eine hohe Konzentration nicht nur von Diamanten, sondern auch von einem Gestein namens Kimberlit auf, das aus großer Tiefe zu kommen scheint. (Es wurden noch ein paar weitere solcher Aufschlüsse gefunden, die Kimberlit, aber keine Diamanten enthalten). Obwohl diese Röhren oft als vulkanisch bezeichnet werden, wurden keine Hinweise auf gefrorene Lava in ihnen gefunden.

Es ergibt sich also ein außergewöhnliches Bild: Diamanten müssen enorme Gasausbrüche darstellen, vermutlich aus einer diamantenbildenden Tiefe von etwa 150 Kilometern. Dort muss sich ein ausreichender Flüssigkeitsdruck aufgebaut haben, um ein Loch durch das gesamte darüber liegende Gestein von 150 Kilometern zu sprengen, und die ausbrechenden Gase haben Material aus der großen Tiefe nach oben getragen. So kommt es also, dass wir an der Oberfläche natürlichen Diamant haben. Der Eruptionsprozess erklärt aber auch, warum der Diamant erhalten blieb und nicht zu Graphit zerfiel. Bei dieser schnellen Eruption würde das treibende Gas schnell abkühlen, und mit ihm die Diamanten. Bei der niedrigen Temperatur an der Oberfläche hätten die Diamanten dann nicht mehr die innere Energie, um ihre Kristallkonfiguration umzuwandeln, und würden daher ein instabiler Festkörper in einem "unterkühlten" Zustand bleiben. (Wir alle kennen unterkühlte Konfigurationen, wie z. B. (Wir alle kennen unterkühlte Konfigurationen, z. B. Messer aus Stahl, die erhitzt und dann schnell abgekühlt wurden und sich dadurch in einen härteren und spröderen Stahl verwandelt haben).

Warum sind Diamanten an der Oberfläche so selten? Sowohl die Konzentration von reinem (nicht oxidiertem) Kohlenstoff in der diamantbildenden Tiefe als auch das Auftreten eines Ausbruchs von dort bis an die Oberfläche sind unwahrscheinlich. Welches ist der Faktor, der die Fördermengen begrenzt? Gibt es einen Zusammenhang zwischen ihnen, so dass die Stellen, an denen sich der Kohlenstoff konzentrierte, auch für große Blasen von Hochdruckgas im Gestein sorgten? Oder sind die beiden Phänomene unabhängig voneinander, so dass man einen sehr hohen Gehalt an Diamanten in den tiefen Gesteinen voraussetzen würde, so dass jede Tiefenbohrung eine gute Chance hätte, Edelsteine hervorzubringen? Wir kennen die Antwort auf diese quälende Frage noch nicht. Schlimmer noch, wir können nicht einmal eine Untersuchungslinie vorschlagen, die im Rahmen unserer derzeitigen Fähigkeiten und Kenntnisse verfolgt werden könnte.

Was aber passiert mit diamanthaltigem Gestein, wenn geologische Prozesse es langsam an die Oberfläche zwingen? Eine Gesteinsplatte in Nordafrika besteht aus Materialien, von denen bekannt ist, dass sie einen sehr tiefen Ursprung aufweisen. Dieses Gestein enthält viele Einschlüsse, die mit Graphit gefüllt sind, der bei niedrigem Druck die kristalline Form von reinem Kohlenstoff ist. Aber dieser Graphit zeigt die oktaedrischen Formen, die charakteristisch für die kristallographische Struktur von Diamant sind. Diese Einschlüsse begannen als Diamanten, so wurde plausibel argumentiert, aber im Laufe eines langsamen Aufstiegs und einer allmählichen Abkühlung setzten sich die Kohlenstoffatome wieder in der Niederdruckform zusammen.[1] Dies ist eine wichtige Beobachtung, denn sie deutet darauf hin, dass zumindest in einigen Bereichen Diamanten in ihrer Entstehungstiefe sehr häufig waren. Die afrikanische Platte mit Graphiteinschlüssen deutet auf eine ursprüngliche Häufigkeit von Diamanten hin, die mehr als 100.000 Mal größer war als in den Kimberlit-Röhren. Dies wiederum impliziert, dass kohlenstoffhaltige Flüssigkeiten auch in diesen Ebenen reichlich vorhanden waren und dass sie reinen Kohlenstoff ablagerten. Vielleicht sind Diamanten an der Erdoberfläche selten, nicht weil sie in der Tiefe selten sind, sondern weil die Eruptionen, die sie schnell transportieren können, seltene Ereignisse sind.

Diamanten enthalten oft Einschlüsse von kohlenstoffhaltigen Flüssigkeiten unter hohem Druck, vor allem Methan und Kohlendioxid.[2] Eines dieser Fluide ist vermutlich die Hauptkohlenstoffquelle, aus der reine Kohlenstoffkristalle in der Tiefe entstanden sind. Ich neige zu der Annahme, dass Methan oder die anderen leichten Kohlenwasserstoffgase hauptverantwortlich waren, weil sie leichter in die einzelnen Atome dissoziiert werden als Kohlendioxid. Die bei weitem dominierende Menge der im Diamant eingeschlossenen Gase ist Stickstoff. Wir kennen den Grund für diese Assoziation nicht, aber es könnte sein, dass Stickstoff zur Bildung von Ammoniak (NH_3) führt und dadurch dem Methan seinen Wasserstoff raubt und die Ablagerung von Kohlenstoff verursacht. Noch kennen wir das chemische Gleichgewicht zwischen diesen beiden Stoffen unter hohem Druck nicht; wir wissen nur, dass sie oft zusammen auf planetarischen Körpern vorkommen und dass keiner den anderen bei niedrigem Druck zerstört.

Die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse in Diamanten wurden in einer Studie über Diamanten verwendet, die aus zwei verschiedenen Gesteinsarten stammen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass weder der Einfluss von recyceltem biogenem Kohlenstoff noch die globale und primordiale Heterogenität des Mantelkohlenstoffs für den Ursprung des großen C-13-Bereichs wahrscheinlich sind; die Daten unterstützen stattdessen einen Fraktionierungsprozess.[3]

Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten stellen ein ähnliches Problem wie Diamanten dar, aber ihre Häufigkeit in der oberen Erdkruste macht uns blind für ihre anomale Präsenz in unserem Bereich. Bei hohen Drücken stellen Kohlenwasserstoffe die stabile Konfiguration von Wasserstoff und Kohlenstoff dar. Kohlenwasserstoffe sollten sich daher spontan im oberen Erdmantel und in der tiefen Kruste bilden. Aber bei niedrigen Drücken an oder nahe der Erdoberfläche sind flüssige Kohlenwasserstoffe unterkühlte, instabile Fluide.

Wenn sie in niedrigere Druckbereiche aufsteigen, beginnen sie zu dissoziieren, was bedeutet, dass sie beginnen, Wasserstoff abzusondern. Das ist genau das, was wir in den vertikal gestapelten Mustern einer Kohlenwasserstoffregion sehen, die von Methan in den tiefsten Schichten zu Ölen und schließlich zu Schwarzkohle in den flachsten Schichten führen. Jeder Schritt in diesem Stapel ist ein weiterer Wasserstoffverlust.

Insgesamt bietet die abiogene Theorie der Erdölbildung die Möglichkeit einer gründlicheren Erklärung für die Entstehung von Diamanten. Ich habe in früheren Kapiteln Einwände gegen einige weit verbreitete Annahmen in der modernen Geologie erhoben, wie z.B. "Die Existenz von Porenräumen in Tiefen von mehr als ein paar Kilometern ist höchst unwahrscheinlich"; "Unoxidierter Kohlenstoff kann nicht in tieferen Schichten als den Sedimenten existieren"; "Kohlenwasserstoffe sind unterhalb einer Tiefe von etwa 15 Kilometern nicht stabil"; und "Gasemission aus tiefen Schichten (wo es keine Porenräume gibt) kann nicht auftreten." Der Prozess der Diamantenbildung, den ich beschrieben habe, steht im krassen Widerspruch zu jeder dieser Annahmen. Die Existenz von Diamanten sagt uns also, dass es in den Tiefen des Mantels Porenräume gibt, die mit kohlenstoffhaltigen Fluiden gefüllt werden können; dass diese Porenräume von Fluiden durchströmt werden können; dass nicht oxidierter Kohlenstoff (die Diamanten selbst und Kohlenwasserstoffgase) in diesen tiefen Ebenen existieren kann und existieren; und dass gigantische Gaseruptionen aus diesen Ebenen auftreten können. Ich kenne keinen anderen Prozess, der sauberen Kohlenstoff zu zentimetergroßen Diamantstücken zusammenbringen könnte, und auch keinen anderen Ausstoßprozess als den, den ich beschrieben habe. Mit dem Wissen, das uns die Diamanten geliefert haben, können wir als nächstes beurteilen, ob die abiogene Theorie eine Möglichkeit bietet, den Mechanismus besser zu verstehen, durch den andere wichtige Ressourcen - konzentrierte Lagerstätten verschiedener Metalle, einschließlich Kupfer, Eisen, Zink, Blei und Uran - entstanden sind.

Die Anreicherung von Metallen in Erzlagerstätten

An Orten auf der ganzen Welt, vor allem aber im nördlichen Südamerika und in der Region Wyoming-Montana in den Vereinigten Staaten, können Metalle in konzentrierten Ansammlungen von Lagerstätten gefunden werden, die Kupfer, Blei, Zink, Silber und Gold in unmittelbarer Nähe enthalten können. Wie kommt es, dass alle diese Metalle in der gleichen Gegend und jeweils in konzentrierten Lagerstätten gefunden werden? Welche Prozesse könnten ein Element herauslösen und seine Ablagerung in einer Konzentration bewirken, die eine Million oder sogar hundert Millionen Mal höher ist als in dem Quellkomposit, aus dem es stammt? Wir finden hohe Konzentrationen bestimmter Metalle sogar in Gesteinen wie Granit, wo solche Ablagerungen eindeutig Intrusionen darstellen, die nach der Erstarrung des Magmas stattfanden.

Damit sich Metallkonzentrationen bilden können, müssen mehrere allgemeine Bedingungen erfüllt sein. Erstens muss, wie bereits erwähnt, ein Fluid vorhanden sein, das durch Porenräume und Klüfte in einem Ausgangsgestein fließen kann, in dem das Metall nur spärlich verteilt ist. Diese Flüssigkeit muss in der Lage sein, das Metall aus dem Gestein aufzunehmen, d.h. auszuwaschen, und es mit der Strömung mitzuführen. Die Auslaugung ist ein sehr energieaufwendiger Prozess. Um dieses Kunststück zu vollbringen, muss es also eine Quelle physikalischer Pumpenergie geben, die die Flüssigkeit durch das Gestein drücken kann. Um dann aus dem ausgelaugten und transportierten Material eine Erzlagerstätte zu machen, muss die Flüssigkeit auf Bedingungen treffen, die dazu führen, dass ihre Metallladung aus der Lösung fällt. Zu diesen Bedingungen kann ein Temperaturabfall gehören, wenn die Flüssigkeit zur Oberfläche aufsteigt. Oder vielleicht verändert die Vermischung mit und die Verunreinigung durch eine andere Art von Flüssigkeit die Chemie und Löslichkeit bis zu einem Punkt, an dem das Metall aus der Lösung fällt. Möglicherweise kann auch ein schwacher Druckabfall während der Reise nach oben die

Dissoziation auslösen. Und, wie wir sehen werden, könnte das Leben in der tiefen heißen Biosphäre sogar eine unterstützende Rolle spielen.

Heißes Wasser wird im Allgemeinen als die Flüssigkeit angesehen, die für die Bildung konzentrierter Metallablagerungen verantwortlich ist, aber die hydrothermale Theorie kann keine realistischen Prozesse berücksichtigen, die einige der Metalle konzentrieren könnten. In der Tat ist das Problem so groß, dass die Antworten Stückwerk sind - einige chemische Reaktionen werden für die Lösung und Ablagerung eines Metalls vorgeschlagen, und ein anderer Satz wird für ein anderes vorgeschlagen. Stückweise Antworten sind besonders fragwürdig, wenn es sich um eine Gruppe von Metallen handelt und für jedes von ihnen ein anderer Weg zur Bildung vorgeschlagen wird, obwohl sie oft dicht beieinander liegen. Das Problem ist allgemeiner, und so sollte eine Lösung gefunden werden, die die kollektiven Phänomene adäquat erklärt. Es gibt Gruppen von Metallen, deren flache Lagerstätten oft in enger Verbindung gefunden werden, wie z.B. Zink mit Blei und Gold mit Silber und anderen Schwermetallen.

Es gibt zwei große Schwierigkeiten mit der hydrothermalen Theorie der Bildung von Metallerzen. Erstens sind viele Metalle, vor allem die Schwermetalle, bei keiner Temperatur ausreichend in Wasser löslich - auch nicht in Solen, die aggressive Salze enthalten. Der Geochemiker Konrad Krauskopf zum Beispiel vermerkte in seinem Lehrbuch, dass die Unlöslichkeit vieler Metalle und ihrer Verbindungen in Wasser "eine seit langem bestehende Schwierigkeit mit der klassischen hydrothermalen Hypothese der Metallablagerung ist." Er gab Beispiele für die enormen Wassermengen, die nur Spuren von Metallen enthalten und die durch Risse geflossen sein müssten, um die Anhäufung der bekannten Metallablagerungen zu erklären. Er kam zu dem Schluss, dass diese Mengen völlig unrealistisch seien.[4]

Das zweite Problem bei der Annahme einer wasserbasierten Flüssigkeit für die Ablagerung von Metallen ist ein wahrscheinlicher Mangel an Pumpleistung für die Auslaugung von Metallen in überhaupt. Wasser zirkuliert durch die äußere Erdkruste, aber nur selten (wenn überhaupt) bis in Tiefen von 10 Kilometern. Bohrungen, die in solche Tiefen gehen, haben eine viel höhere Wahrscheinlichkeit, leichte Kohlenwasserstoffflüssigkeiten als Wasser zutage zu fördern. Wenn wir also davon ausgehen, dass die wasserbegünstigte Auslaugung in einer Tiefe von nicht mehr als etwa 10 Kilometern stattfindet, dann wäre der Druck, der die Pumpaktion in dieser Tiefe antreibt, höchstens durch das Deckgebirgsgewicht des Gesteins gegeben, einschließlich des Gewichts der darin enthaltenen Flüssigkeit (die normalerweise nur einen sehr kleinen Bruchteil des Gesamtgewichts ausmacht). Die maximale Leistung, die zum Antrieb der Strömung und damit der Auslaugung zur Verfügung steht, wäre unter der Annahme, dass sich Wasser und Gestein in der Tiefe zunächst im Druckgleichgewicht befinden, das Volumen, das pro Zeiteinheit ausgestoßen wird, multipliziert mit der Druckdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittspunkt (wobei die Komponente, die sich nur aus der statischen Förderhöhe des Wassers ergibt, wegfällt). In einer Tiefe von 10 Kilometern würde das Gewicht des Deckgebirges einen Druck von etwa 3000 bar (3000 Atmosphären) erzeugen, und die statische Wassersäule würde etwa 1000 bar betragen. Somit stünden 2000 bar (nur 2 Kilo-Bar) zur Verfügung, um die Flüssigkeit durch das Gestein zu treiben. Dies ist keine beeindruckende Druckmenge für die geforderte Aufgabe und würde der Flüssigkeit keine starke Auslaugfähigkeit verleihen.

Bessere Kandidaten für die Auslaugung und den Transport von Metallen sind Kohlenwasserstoffe. Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten übertreffen Wasser sowohl in der Fähigkeit, Metalle in Lösung zu halten, als auch in der Pumpleistung, die für den energieintensiven Auslaugungsprozess erforderlich ist. Betrachten Sie zum Beispiel die Auslaugungskraft einer Kohlenwasserstoffflüssigkeit, die aus einer Quelltiefe aufwärts fließt, die in etwa derjenigen entspricht, in der Diamanten entstanden sind, und zwar zweifellos durch die Dissoziation von reinem Kohlenstoff aus einer kohlenstoffhaltigen Flüssigkeit. In einer Tiefe von 150 Kilometern würde das Druckbad 40 Kilo-Bar betragen, also etwa das 40.000-fache des atmosphärischen Drucks auf Meereshöhe. Wenn wir die gleichen Dichteannahmen wie in unserem vorherigen Beispiel verwenden, würden wir eine treibende Kraft für die Auslaugung von etwa 35 Kilo-Bar erwarten. Dies ist weitaus größer als die 2 Kilo-Bar der Auslaugkraft, die wir in unserem vorherigen Wasser Beispiel berechnet haben. Schon allein diese Tatsache sollte uns darauf aufmerksam machen, dass wir untersuchen müssen, ob diese Fluide, die eine so hohe Antriebskraft für die Auslaugung durch große Entfernungen von Gesteinen haben, irgendetwas mit den Metallkonzentrationen zu tun haben, die von irgendeiner Art von Auslaugungslösung abgelagert worden sind.

Ein weiterer Punkt, der für Kohlenwasserstoffe als fluide Träger von Metallen spricht, ist, dass wir wissen, dass viele Metalle tatsächlich in Erdöl transportiert werden. Kohlenwasserstoffe können mit Metallen molekulare Arrangements eingehen und Komplexe bilden, die als *Organometalle* bezeichnet werden. Organometallische Moleküle wurden in jedem Rohöl, das analysiert wurde, identifiziert; Vanadium- und Nickelporphyrine sind die bekanntesten, aber es gibt noch einige andere. Organometallische Gold- und Silbermoleküle sind zum Beispiel in einigen Rohölen nachweisbar, wenn auch nur in Spuren.

Porphyrine sind eine Gruppe von metallorganischen Verbindungen, die neben Kohlenstoff und Wasserstoff auch Stickstoff enthalten. Porphyrine wie Hämoglobin (mit einem einzelnen Eisenatom in seinem Kern) und Chlorophyll (mit einem einzelnen Magnesiumatom in seinem Kern) sind wertvolle Katalysatoren und werden von vielen bekannten Formen des Oberflächenlebens hergestellt. Der Ursprung der im Erdöl gefundenen Porphyrine wurde daher leicht auf biologische Ablagerungen zurückgeführt. Diese Erklärung würde dazu führen, dass wir erwarten würden, hauptsächlich Magnesium- und Eisenporphyrine in Erdöl zu finden. Es ist jedoch kein einziger Fall bekannt, in dem sie in Erdöl vorkommen.[5] Stattdessen wurden durchweg nur Nickel- und Vanadiumporphyrine gefunden. Es scheint äußerst unwahrscheinlich, dass in allen Ölen die ursprünglichen Metallatome nur gegen Nickel und Vanadium aus den Gesteinen der Umgebung ausgetauscht wurden. Außerdem ist nicht geklärt, wie Pflanzenreste die Nickel- und Vanadiummoleküle erzeugt haben sollen, wenn sie den relativ niedrigen Drücken und Temperaturen ausgesetzt waren, die nach der vorherrschenden Ansicht für die Entstehung und Stabilität biogener Kohlenwasserstoffe notwendig sind. In dem in diesem Buch dargestellten Bild der tiefen Erde ist jedoch durchaus zu erwarten, dass sich bei den hohen Temperaturen und Drücken in der Tiefe Nickel- und Vanadiumkomplexe bilden. Möglicherweise sind diese beiden einfach die metallorganischen Verbindungen, die am längsten überleben, nachdem viele andere in tieferen Schichten außerhalb unserer Reichweite zerfallen sind.

Meines Wissens hat noch niemand eine Vorstellung von der metallorganischen Chemie entwickelt, die bei einem Druck von, sagen wir, 50 Kilo-Bar herrschen würde. Wir haben bis jetzt nur wenige Laborsimulationen dieser Art. Sicherlich würden viele Moleküle bei diesem Druck zusammengehalten werden, auch wenn sie bei den Drücken nahe der Krus-

tenoberfläche leicht zerfallen würden. Darunter könnten viele metallorganische Moleküle sein, deren Bildung weniger Volumen beansprucht als die Materialien, von denen sie abgeleitet sind. Möglicherweise wird eine ganze Reihe von Organometallen durch Kohlenwasserstoffe gebildet, die in großen Tiefen und über weite Entfernungen durch Gesteine ausgewaschen werden.

Organometallverbindungen werden nicht nur aus Kohlenwasserstoffen zusammen mit den Metallen *gebildet*, die die Kohlenwasserstoffe auf ihrem langen Weg nach oben aus dem Gestein auslaugen können, sondern sie können auch durch Kohlenwasserstoffe *transportiert* werden. Die meisten Organometalle sind in Kohlenwasserstoffölen löslich und werden daher mit der Strömung mitgerissen. Wenn Temperatur, Druck oder andere Löslichkeitsbedingungen einen Schwellenwert erreichen, bei dem eine bestimmte Art von Organometall nicht mehr vom Strom mitgenommen werden kann, würde sich an dieser Stelle eine konzentrierte Metallablagerung bilden.

Der Kohlenwasserstoffstrom würde auf dem Weg nach oben eine große Anzahl von Molekülen erzeugen, wobei die einzelnen Moleküle von Dingen wie dem Kohlenstoff-Wasserstoff- Verhältnis bei der Bildung, dem Verhältnis zu anderen Elementen wie Stickstoff und Sauerstoff, der katalytischen Wirkung bestimmter Mineralien in den Gesteinen und dem Druck-Temperatur- Regime abhängen, auf das man auf dem Weg trifft. Unter diesen Molekülen kann eine Klasse sein, die ungewöhnlich günstig ist für die Bildung einer bestimmten organometallischen Verbindung mit einem Metall, eine andere Klasse mit einem anderen. Die große Vielfalt der Kohlenwasserstoffmoleküle (unterschieden durch die Anzahl der Kohlenstoffatome, die in Ketten, in Ringen oder in einer Kombination der beiden miteinander verbunden sind) könnte somit der Grund für die Selektivität in den Metallablagerungen sein. Verschiedene Arten oder Gruppen von Metallen würden dicht gepackt auftreten, was auf einen allgemeinen Kohlenwasserstoff-Aufschwung in dem Gebiet hindeutet, dennoch könnten die Ablagerungen aufgrund von Unterschieden in der Affinität der Metalle zu verschiedenen Kohlenwasserstoffmolekülen voneinander getrennt sein. Es wäre auch zu erwarten, dass Kohlenwasserstoffe mit größerer oder geringerer Kohlenstoffzahl oder anderen strukturellen Merkmalen sich bei unterschiedlichen Schwellenänderungen von Temperatur, Druck, Säuregehalt und gelösten Stoffen von ihren metallischen Bestandteilen entladen. Dies könnte durchaus die Beobachtung erklären, dass Blei und Zink typischerweise zusammen gefunden werden, Gold mit Silber, und so weiter.

Zu den empirischen Belegen für die Kohlenwasserstoff-Theorie der Metallablagerung gehört die enge Verbindung von Kohlenstoff und Gold, die sowohl in wissenschaftlichen als auch in populären Berichten über das Schürfen von Mineralien gut dokumentiert ist. Goldgräber in Colorado, Kalifornien, dem Yukon und Südafrika waren sich dieser typischen Verbindung bewusst und suchten nach einer "schwarzen Spur" - einer Spur aus Kohlenstoff. Sie gruben dann entlang der geschwärzten Passagen, in der begründeten Hoffnung, einen Gesteinskörper zu erreichen, der eine nützliche Beimischung von Gold enthielt. Die konventionelle geologische Weisheit gibt keinen Hinweis auf eine Erklärung für diese Assoziation, aber die Gas-Tiefen- Theorie tut es sicherlich. Das Gold wurde aus dem Tiefengestein ausgelaugt und als Anorganometall durch einen aufsteigenden Strom von Kohlenwasserstoffen transportiert. Aufgrund von Druckveränderungen und anderen Bedingungen auf dem Weg dorthin dissoziiert das Metall irgendwann von dem Kohlenwasserstoffmolekül. Und wie bei Kohleablagerungen entweicht schließlich auch der Wasserstoff aus dem Trägermolekül und hinterlässt Kohlenstoff oder Ruß, der dann vom

fließenden Wasser ein Stück weit mitgerissen werden kann - daher der "schwarze Vorspann".

Es ist interessant, dass die andere Substanz, die üblicherweise mit Gold in Verbindung gebracht wird, Siliziumdioxid-Quarz ist. Silizium befindet sich in der gleichen Spalte und unterhalb von Kohlenstoff in Mendelejews Tabelle der Elemente (dem Periodensystem), und die beiden haben sehr ähnliche Eigenschaften. Silizium ist jedoch viel reaktiver als Kohlenstoff. Es kommt nur in oxidierter Form vor, während Kohlenstoff sowohl in oxidierter als auch in reduzierter Form vorkommt. Silizium bildet Öle, die den Kohlenwasserstoffölen recht ähnlich sind, aber manchmal höhere Schwellenwerte für die thermische Stabilität aufweisen. Siliziumöle und Kohlenwasserstofföle sind mit ziemlicher Sicherheit ineinander löslich. Ich weiß nicht (und möglicherweise weiß es auch niemand), ob sich bei hohen Temperaturen und Drücken Silizium-Metallverbindungen bilden, die den Organometallen ähnlich sind. Ein Argument für Siliziumöle als Metallträger ist das Vorkommen von Gold in Quarzadern und nicht in Quarzablagerungen, was auf einen gemeinsamen Migrationsweg sowohl für das Siliziumdioxid als auch für das Gold schließen lässt.

Manchmal sind es nicht nur Rußreste, sondern die Kohlenwasserstoffe selbst, die mit Metallvorkommen in Verbindung gebracht werden. In den antiken Zinnminen im Granitgestein von Cornwall, England - Minen, die das alte Rom mit Zinn versorgten - tropft zum Beispiel Öl auf die Bergleute bei der Arbeit herab. Andere Standorte des Metallbergbaus, die mit Kohlenwasserstoffen in Verbindung gebracht werden, sind Wyoming, Alaska und das Uralgebirge. Methanexplosionen im Granit einer Eisenmine in Neufundland haben den dortigen Bergbaubetrieb zum Erliegen gebracht. Trotz erheblicher Beweise für den Zusammenhang zwischen Metallen und Kohlenwasserstoffen neigen wissenschaftliche Abhandlungen, die über diese Befunde berichten, immer noch zu hydrothermalen Erklärungen für die Metalle und gehen davon aus, dass die Kohlenwasserstoffe eine bloße Verunreinigung sind, die sie auf nahe gelegene biologische Ablagerungen zurückführen.[6]

Viele Metalle bilden bereitwillig Metallsulfide, wenn Schwefel vorhanden ist. Quecksilber, wie das Sulfid Zinnober, wird oft zusammen mit Öl und Teer gefunden. Quecksilber kann in einem Gasstrom als Quecksilberdampf auftauchen oder als Dimethyl-Quecksilber auftauchen, das genug Schwefel hat, um sich in Zinnober umzuwandeln. Dieser Mechanismus würde auch auf viele andere Metalle zutreffen, die einer Bindung an Schwefel und damit einer Umwandlung in Metallsulfide nicht widerstehen können. Für Quecksilber ist es besonders deutlich, dass das Metall aus großen Tiefen stammt; es ist stark mit Helium assoziiert, insbesondere mit Helium mit einem hohen Gehalt an dem Isotop Helium-3, das der Marker für primordiales Helium ist, das bei der Entstehung der Erde eingefangen wurde und eine kleine Ergänzung zu dem Helium darstellt, das aus der Radioaktivität von Uran und Thorium stammt.

Ist die tiefe heiße Biosphäre in irgendeiner Weise an den Metallablagerungen beteiligt? Man könnte spekulieren, dass mikrobielle Aktivität in einigen Fällen eine Rolle spielt, insbesondere bei der Bildung von Nuggets aus reinen Metallen. Es ist durchaus denkbar, dass Mikroben die Kohlenwasserstoffkomponente der Organometalle als angenehm empfinden und daher die Initiative ergreifen, das Metall in einer Tiefe unterhalb der Schwelle, bei der eine Dissoziation abiotisch stattfinden würde, von dem umgebenden Kohlenwasserstoff zu befreien. Man könnte auch vermuten, dass verschiedene Stämme mikrobiellen Lebens unterschiedliche metallorganische Verbindungen zum Abbau bevorzugen. Das könnte vielleicht den Effekt erklären oder dazu beitragen, der in diesem Rätsel of-

fensichtlich von großer Bedeutung ist: die Anhäufung mehrerer verschiedener Metallvorkommen in eng benachbarten Regionen. Das wären Regionen, in denen der Kohlenwasserstoffauftrieb generell stark war und in denen einige Mikroben in einigen Flecken dominant wurden, andere Mikroben in anderen.

Es ist schließlich gut dokumentiert, dass vertraute Oberflächenbakterien bemerkenswerte geochemische Ingenieure sind, die ihre Umgebung auf eine Weise umgestalten, die zur Bildung von Mineralkristallen oder sogar großen, einheitlichen Ablagerungen führt. Es wird allgemein angenommen, dass Mikroben konzentrierte Ablagerungen einer Vielzahl von Mineralien bilden können.[7] Zum Beispiel produziert das Bakterium *Desulfovibria* Kristalle von Pyrit (FeS_2), Greigit (Fe_3S_4), Sphalerit (ZnS) und Bleiglanz (PbS). Verschiedene Arten von Bakterien produzieren Magnetit - der, wie Sie sich vielleicht erinnern, am Boden unserer beiden Siljan-Bohrungen gefunden wurde.

Die Anreicherung von Metallen in Sedimentschichten lässt sich leicht durch Szenarien der mikrobiellen Vermittlung erklären, die innerhalb des Paradigmas des Oberflächenlebens bleiben. Man würde einfach annehmen, wie es die meisten Geologen tun, dass die Mikroben ihre Arbeit als Teil der Oberflächenbiosphäre verrichteten, während sich die Sedimente zunächst in einem Flussdelta, am Boden eines Sees usw. ansammelten. Aber die Metallkonzentrationen in den Adern, die das Eruptivgestein durchziehen, widerstehen einer solchen Erklärung. Diese Umstände sprechen nur dann für eine mikrobielle Erklärung, wenn man akzeptiert, dass sich Mikroben in der Tiefe von Kohlenwasserstoffen ernähren - also nur dann, wenn man die Theorie der tiefen heißen Biosphäre akzeptiert.

Die Untersuchung dieser und anderer möglicher biogener Wege der Metallablagerung wurde bisher durch die feste und weit verbreitete Überzeugung stark eingeschränkt, dass Öle nur aus biologischem Material, das an der Erdoberfläche erzeugt und dann vergraben wurde, entstanden sein können. Bei den bisher untersuchten Biomineralisationen handelt es sich fast ausschließlich um die Produkte des Oberflächenlebens oder derjenigen bakteriellen Mitglieder der Oberflächenbiosphäre, die in sauerstoffarmen Sedimenten knapp unter der Oberfläche ihr Auskommen finden.

Unabhängig davon, ob die Beute, die für Bergbauunternehmen von Interesse ist, von Kohlenwasserstoffen aus der Tiefe allein oder in Zusammenarbeit mit mikrobiellen Bemühungen in der tiefen heißen Biosphäre stammt, glaube ich, dass Kohlenwasserstoffe tatsächlich die Flüssigkeiten sind, die für die Auslaugung, Bindung und den Transport vieler Metalle verantwortlich sind. Aufgrund ihres tiefen Ursprungs bieten Kohlenwasserstoffe die für eine umfangreiche Auslaugung erforderliche Antriebskraft, und sie können viele Arten von Molekülen, die auf diese Weise gebildet werden, in Lösung tragen. Die größte Ungewissheit betrifft die Bildung verschiedener metallorganischer Hochdruckverbindungen, und diese Frage kann mit den jetzt verfügbaren Informationen nicht geklärt werden. Dennoch glaube ich, dass Kohlenwasserstoffe die besten Flüssigkeiten für das Pumpen, das Auslaugen und die Löslichkeitsanforderungen sind, um Metalle durch die Kruste nach oben zu bewegen.

Ist das alles nur Fantasie? Wie realistisch können diese Spekulationen sein, da sie wichtige Fragen der Hochdruckchemie betreffen, die noch nicht erforscht sind? Experimente bei 40 Kilo-Bar Druck oder mehr sind sehr schwierig oder sehr teuer. Da die vorherrschende Meinung im Westen ist, dass Kohlenwasserstoffe in der Tiefe einfach nicht existieren, scheint es keinen Grund zu geben, die Idee in Betracht zu ziehen, geschweige denn zu

testen, dass Kohlenwasserstoffe, die aus großen Tiefen aufsteigen, die Ursache für konzentrierte Metallvorkommen sind. Und dies trotz der starken Andeutung einer regionalen Verbindung von Clustern verschiedener Metallerze mit Erdöl. Ich hoffe, dass die hier gegebenen Hinweise und vorgeschlagenen Erklärungen einen Funken des Interesses daran entfachen, festgefahrene, aber vielleicht ungültige Annahmen zu überprüfen, die ansonsten den Fortschritt im Verständnis der Entstehung und Lage wichtiger Metallvorkommen verzögern könnten.

Kapitel 8

Erdbeben neu überdenken

Erdbeben erzählen uns von der Gewalt, die im Inneren der Erde herrscht. Offensichtlich treten sehr heftige und schnelle Ereignisse auf, aber die Gründe für diese Ereignisse sind noch nicht vollständig verstanden, und viele scheinbare Anomalien bleiben unerklärt. Ich glaube, dass die Gas-Tiefen-Theorie der Erde einen großen Schritt in Richtung der Entwicklung einer neuen, umfassenderen und nützlicheren Theorie dieses Phänomens gehen kann.

Nach der Erdgastheorie stößt die Erde kontinuierlich Fluide aus großen Tiefen aus, darunter auch jugendliche flüchtige Stoffe, die aus dem Erdmantel aufsteigen. Einige dieser Fluide steigen als Teil eines Stroms aus flüssigem Gestein - Magma - auf, der bei vulkanischen Ereignissen an die Oberfläche drängt. Andere durchbrechen die Oberfläche in der kontinuierlichen und ruhigeren - aber immer noch gut sichtbaren - Art von Schlammvulkanen, die anstelle von Lava Schlamm ausstoßen. Schlammvulkane finden sich an Orten mit anhaltender vulkanischer Aktivität (Island), in geothermischen Gebieten ohne aktiven Vulkanismus (Yellowstone) und auch in relativ kühlen geologischen Provinzen, die eine kommerzielle Öl- und Gasförderung unterstützen (Südalaska, die ölreiche Zone des Nahen Ostens und der gesamte indonesische Bogen).

Schlammvulkane

Viele Arten von geologischen Erscheinungen auf Landoberflächen, Meeresböden und Eisfeldern deuten darauf hin, dass eine Emission von Gasen aus dem Boden stattgefunden hat. Diese Erscheinungen finden sich oft in Regionen, in denen Erdbeben häufig sind. Die größten davon sind die Lavavulkane, die nicht nur flüssiges Gestein an die Oberfläche transportieren, sondern auch Kanäle aus der Tiefe öffnen, durch die Gase aufsteigen können. Wir kennen dies von den heftigen und verheerenden Explosionen, die manche Eruptionen begleiten.

Ein weniger bekanntes, aber dennoch wichtiges Landoberflächenmerkmal, das als Indiz für Gasausbrüche gilt, sind die Schlammvulkane. Auch hier steigen Gase aus dem Boden in die Atmosphäre auf, manchmal so explosiv, dass sie weiches Schwemmland (Schlamm) mitreißen, auf das sie unterwegs treffen. Die Eruption besteht zunächst aus Gas und Schlamm; das Gas verschwindet in die Atmosphäre, aber der Schlamm setzt sich um die ursprüngliche Öffnung herum ab und trocknet aus, wobei er einen Berg bildet, der ähnlich wie ein Lavavulkan aussieht, dem aber die Hitze der Lava fehlt. In einigen großen Schlammvulkanfeldern steigen einzelne Vulkane bis zu einer Höhe von mehreren hundert Metern auf und entwickeln Öffnungen mit einem Durchmesser von 100 Metern und

mehr. Die Basis solcher Berge kann mehrere Kilometer im Durchmesser messen. Die austretenden Gase sind meist brennbar, enthalten überwiegend Methan und fangen bei großen Eruptionen spontan Feuer, vermutlich durch elektrische Funken, die durch Reibung entstehen. Ein Foto, das in Baku (Aserbaidschan, einer bedeutenden Region für große Schlammvulkane) aufgenommen wurde, zeigt eine 2 Kilometer hohe Flamme, die über einer Öffnung von 120 Metern Durchmesser steht.[1]

Die Gasmengen, die für die Entstehung dieser riesigen Strukturen aufgetreten sein müssen, wurden mit Hilfe von Instrumentendaten für das Verhältnis von Gas zu Schlamm, die bei mehreren Eruptionen beobachtet wurden, geschätzt. Die so ermittelten Werte übersteigen bei weitem den Gasgehalt der größten kommerziellen Gasfelder der Welt.

Wenn Schlammvulkane die Gasemissionspunkte auf Landoberflächen sind, müssen wir erwarten, dass solche Punkte auch auf den Ozeanböden und in den großen Eisfeldern der Polarregionen und Hochgebirge existieren. Wie treten sie in diesen Umgebungen auf?

Auf den Ozeanböden sind solche Merkmale bei Sonaruntersuchungen als kreisförmige Markierungen im Meeresschlamm identifiziert worden. Diese Merkmale wurden als Punkt bezeichnet, und es wurden sehr große Felder mit dicht aneinander gereihten Punkte identifiziert.[2] Die einzelnen Kreise können einen Durchmesser von 1 Meter haben oder bis zu 200 Meter groß sein. In einigen Fällen (z. B. in der Nordsee) liegen sie ziemlich genau über Feldern mit kommerzieller Gasproduktion und zeigen erhöhte Methankonzentrationen im Wasser über ihnen. Punkte zeigen auch Ablagerungen von rissfüllenden Karbonatzementen, ein Phänomen, auf das ich bereits hingewiesen habe.[3] Man nimmt an, dass diese Markierungen entstehen, wenn plötzliche Ausstöße von Methangas eine Menge Meeresschlamm anheben, der sich dann in regelmäßiger Weise auf dem Boden absetzt und so kreisförmige Muster hinterlässt. Sonar kann durch einige Meter Meeresschlamm hindurchdringen und so Ebenen aufdecken, in denen ähnliche Punktefelder durch spätere Ablagerungen von Schlamm begraben wurden. Diese Felder befinden sich im Allgemeinen in einem gut definierten Tiefenintervall, was darauf schließen lässt, dass der Emissionsprozess episodisch stattfand, mit separaten Ereignissen im Abstand von einigen hundert oder tausend Jahren. Da massive Gasemissionen angezeigt werden, fielen sie wahrscheinlich mit Erdbeben zusammen.

In Permafrostgebieten der hohen Breiten treten diese Gasemissionsmerkmale in Form von "Eisvulkanen" oder Pingos auf. Wie bei Punkten zeigen auch Pingos, dass episodische Gasemissionen aus tieferen Schichten flüssiges Wasser aufgestiegen ist, das dann gefroren ist, während es an den Flanken des Vulkans herunterfloss. Da Eis keine dauerhafte Festigkeit besitzt, sondern langsam fließt, verschwinden diese Merkmale bald, und nur sehr junge Pingos sind zu erkennen.

Es gibt gute Gründe zu untersuchen, ob die Emission von Gasen in Schlammvulkanen, Ozeanpockennarben und Pingos in irgendeiner Weise mit Erdbeben im Allgemeinen zusammenhängt, entweder als ein von Erdbeben ausgelöster Effekt oder als eine Ursache von Erdbeben.

Eine Herausforderung für die Erdbebentheorie

Der Großteil der Fluide aus der tiefen Erde bahnt sich seinen Weg nach oben wahrscheinlich in einem gemächlicheren Tempo als die Gase, die Schlammvulkane versorgen. Auf

dem Weg dorthin erzeugen sie hauptsächlich Risse in der Aufwärtsrichtung, da die Gesteinsüberdeckung abnimmt und weniger widerstandsfähig gegen die Gasdruckfrakturierung ist. (Das Gas hat eine geringere Dichte als das Gestein und ist daher relativ zu diesem schwimmfähig.) Solche Brüche dienen dann als Leitungen durch die feste Lithosphäre. Wenn diese Fluide den oberflächennahen Druck erreichen, werden die meisten zu unsichtbaren Gasen: Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und vielleicht Wasserstoff sowie Stickstoff, Helium und verschiedene Spurengase wie Radon. Erdölsickerungen stellen den sichtbaren, flüssigen Anteil der aus der Tiefe aufsteigenden Fluide dar.

Die vorherrschende Ansicht ist, dass Erdbeben durch die katastrophale Freisetzung tektonischer Kräfte verursacht werden, die allmählich Spannungen in den Gesteinen aufbauen. Bei einem bestimmten Schwellenwert wird die Festigkeit des Materials überschritten, und es kommt zu einer plötzlichen Verschiebung des Gesteins, die ein Erdbeben verursacht. Einige Fluide können als Folge von mechanisch verursachten Brüchen im Gestein austreten, aber in dieser Theorie spielen sie eine völlig passive Rolle.

Ich denke, dass aufsteigende Flüssigkeiten aus der Tiefe der Erde, aus Regionen mit höherem Druck als dem, der durch das Gewicht der Gesteinsüberdeckung ausgeübt wird, mehrere erdbebenbedingte Auswirkungen haben werden. Insbesondere werden sie Brüche erzeugen und dadurch das bisherige Spannungsmuster verändern, das manchmal von den Kräften unbekannten Ursprungs erzeugt wird, die für plattentektonische Bewegungen verantwortlich gemacht werden. Ein plötzlicher Zustrom von Gas von unten wird das Gestein durch die Bildung neuer Risse plötzlich schwächen und es sogar an die Bruchgrenze bringen und bringt es sogar unter der vorher aufgebrachten Spannung zum Brechen. Ein Einströmen von Gas würde sich auch in die Verwerfungslinien ausdehnen und durch das Auseinanderhalten der Flächen die innere Reibung stark verringern und so ebenfalls Erdbeben begünstigen.

Nachdem der Flüssigkeitsstoß in die Atmosphäre gelangt ist, können die dabei entstandenen Porenräume kollabieren; ein solcher Kollaps bietet eine gute Erklärung für die vertikale Verschiebung von Krustenstücken bei Erdbeben und für die volumetrischen Veränderungen des Meeresbodens oder des Kontinentalschelfs, die zur Auslösung von Tsunamis erforderlich wären. Bei dem großen Erdbeben in Alaska am 28. März 1964 zum Beispiel sanken einige Landstriche innerhalb von Sekunden um bis zu 30 Fuß ab. Vermutlich bedeutet dies, dass der Boden darunter plötzlich dichter wurde. Aber Gesteine sind weder in einem solchen Ausmaß komprimierbar, noch würde eine solche Kompression plötzlich auftreten. Es muss sich um Porenräume gehandelt haben, die das Gestein mit Hochdruckgas ausgedehnt hatten, und als das Gas plötzlich einen Fluchtweg fand, kollabierten die Poren. Keine andere Flüssigkeit als ein Gas hätte das Gestein stützen und dann in Sekundenschnelle aus dem Weg gehen können. Ähnliche Ereignisse sind bei vielen historischen Erdbeben aufgezeichnet worden.

Die gegenwärtige, in den westlichen Ländern populäre Sichtweise ist, dass Erdbeben rein tektonischen Ursprungs sind, verursacht durch einen Anstieg der Spannungen im Gestein. Diese Sichtweise entstand aber erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Etwa zu dieser Zeit wurde der Seismograph erfunden und in Betrieb genommen.[4] Seine Verfügbarkeit bedeutete, dass Erdbeben anhand der gewonnenen seismischen Aufzeichnungen im Detail untersucht werden konnten. Daten konnten nun von Seismographen gesammelt werden, die an Orten installiert waren, die weit von einem Erdbebenereignis entfernt waren, und diese Daten waren absolut quantitativ und nicht durch subjektive Interpretationen verfälscht.

Die Erfindung des Seismographen bedeutete, dass es nicht mehr notwendig war, ein Erdbeben direkt zu erleben oder jemanden zu befragen, der es erlebt hatte, um Daten über das Ereignis zu sammeln. Die Möglichkeiten, die diese neue Technologie bot, wurden selten durch Augenzeugenberichte ergänzt. Solche Berichte, die zwangsläufig qualitativ und durch Subjektivität getrübt waren, wurden leider nicht mehr als wertvoll für das wissenschaftliche Unterfangen angesehen. Dennoch kann man viel aus ihnen lernen.

Augenzeugenberichte

Wenn heute von Augenzeugenberichten berichtet wird, ähneln sie sehr denen, die im Laufe vieler Jahrhunderte gesammelt und aufgezeichnet wurden. Die Ähnlichkeit von Berichten, die geografisch und zeitlich weit entfernt sind, bestätigt ihre Wahrhaftigkeit. Eruptionen, Flammen, Geräusche, Gerüche, Erstickung, Wasser- und Schlammfontänen - all dies sind heute wiederkehrende Themen, genau wie in der Antike. Die Erdbeben haben ihren Charakter sicher nicht verändert. Nur die Ermittler haben ihre Aufmerksamkeit verschoben.

Mein Kollege Dr. Steven Soter hat historische, in verschiedenen Ländern veröffentlichte schriftliche Aufzeichnungen von Augenzeugenberichten über Phänomene im Zusammenhang mit großen Erdbeben von der Antike bis in die Neuzeit gesammelt.[5] Hier werde ich einige der interessanteren, aber dennoch völlig repräsentativen Beispiele vorstellen. Diese werden dazu beitragen, zu erhellen, warum Erdbeben am besten als Ausgasungsphänomene im Rahmen der Tiefseegastheorie verstanden werden können.

Erdbeben in Griechenland und Italien sind ziemlich häufig, und in der klassischen Literatur Griechenlands und Roms finden sich viele Hinweise auf sie. Damals waren Vulkane und Erdbeben die einzigen Informationsquellen über den tieferen Boden der Erde. Was sich dort unten befand, stellte man sich eher furchterregend vor, und allein aus diesem Grund zogen diese Phänomene eine Menge Aufmerksamkeit auf sich.

Aristoteles, dessen klassische Schriften und Autorität die Erklärungen von Naturereignissen im Westen 1800 Jahre lang dominierten - manchmal mit richtigen und manchmal mit falschen Theorien - lieferte die erste detaillierte Diskussion über den Erdbebenprozess. Ihm zufolge wurde die Theorie, dass Gase ("Luft") für Erdbeben verantwortlich sind, wurde zuerst von Anaxagoras vorgeschlagen, der sagte, dass "die Luft, deren natürliche Bewegung aufwärts gerichtet ist, Erdbeben verursacht, wenn sie in Hohlräumen unter der Erde eingeschlossen ist." Im Jahr 63 n. Chr. schrieb Seneca einen Überblick über die Erdbebenliteratur der damaligen Zeit und betonte: "Es ist eine Lieblingstheorie der meisten der größten Autoritäten, dass bewegte Luft die Ursache von Erdbeben ist."

Warum favorisierten die Alten Luft (oder Gas, wie wir es heute nennen würden) als das aktive Element bei Erdbeben? Zum einen vermuteten sie eine enge Verbindung zwischen seismischen und vulkanischen Phänomenen. Sie glaubten, dass Vulkanausbrüche, bei denen eindeutig Gas im Spiel ist, ein Ventil für die Kräfte darstellen, die sonst Erdbeben erzeugen würden. Das Vorhandensein von unterirdischer Luft war in der Antike allgemein akzeptiert. Seneca, zum Beispiel, hatte "keinen Zweifel, dass eine große Menge Luft im Untergrund liegt". Trotz vieler Unklarheiten über die Wirkung unterirdischer Gase scheint es eine starke Beobachtungsgrundlage für die Theorie gegeben zu haben. Die Alten konnten natürlich nicht wissen, dass die "Luft", die von unten kommt, einige träge Gase enthält, die wir heute als Kohlendioxid, Stickstoff und Helium bezeichnen, aber sie

waren sich der physikalischen Manifestationen von Ausbrüchen unsichtbarer Dämpfe, wie z. B. vom Boden nach oben geschleuderter Sedimente, durchaus bewusst. Die Alten hätten die verschiedenen brennbaren Gase, die wir heute als Methan, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff klassifizieren, nicht unterscheiden können - einige von ihnen hätten, wenn sie in Mengen und unter Bedingungen austreten, die nicht verbrennbar sind, auch sichtbare Dunstschleier in der Atmosphäre oder Nebel am Boden sowie Erstickungen von Tieren verursacht. Aber die Alten waren sich dieser physischen Manifestationen von Eruptionen unsichtbarer Dämpfe sehr wohl bewusst, und sie sahen mit Entsetzen zu, wie sich brennbare Gase entzündeten (die, wie wir heute wissen, durch elektrostatische Funken entzündet wurden, die durch die Reibung von sich schnell bewegenden Körnern am Gestein verursacht wurden).

Die gesammelten Beobachtungen, die in der Folklore aufbewahrt und von der damaligen Intelligenz betrachtet wurden, bedeuteten, dass die Alten eine Vielzahl von Phänomenen erkannten, die gut als Warnungen vor einem bevorstehenden Beben zu dienen schienen. In mancher Hinsicht ist die Volkskunde für die Bewohner erdbebengefährdeter Regionen von größerem praktischem Wert als unsere moderne Wissenschaft. Pausanias bemerkte in seiner Beschreibung von Achaia, dass "im Winter die Temperatur in der Region, in der das Erdbeben auftreten wird, plötzlich ansteigt. Im Sommer gibt es eine Tendenz zur Dunstbildung, und die Sonne präsentiert eine ungewöhnliche Farbe.... Wasserquellen versiegen im Allgemeinen; große Flammen zucken über den Himmel.... Außerdem gibt es ein heftiges Grollen der Winde unter der Erde."

Der Temperaturanstieg im Winter, als Vorbote eines Erdbebens, wurde in vielen historischen Berichten vermerkt. Die Ausgasungstheorie erklärt den Anstieg auf diese Weise: Alle Porenraumgase aus den oberflächennahen Schichten des Bodens werden als erstes an die Oberfläche ausgestoßen; mit einer Temperatur nahe dem Jahresmittel, wie sie im Boden in den oberflächennahen Schichten herrscht, werden sie im Winter im Allgemeinen wärmer sein als die Oberflächentemperatur. Im Sommer wird Erdbebengas noch nachweisbar sein, da es einige mikroskopische Partikel sowie einen angereicherten Anteil an Kohlendioxid mit sich bringt. Kohlendioxid und andere schwere Gase neigen dazu, sich an den Boden zu schmiegen und in Täler zu sickern, wodurch ein ungewöhnlicher Nebel entsteht (der Nebel im Winter wird durch die Kondensation von Wassertröpfchen dominiert, da die aufsteigenden Gase mit Wasserdampf gesättigt sind, wenn sie in die kältere Oberflächenluft eintreten). Diese Phänomene wurden in der Geschichte immer wieder aufgezeichnet und waren, wie wir noch sehen werden, maßgeblich an der erfolgreichen Evakuierung einer chinesischen Stadt kurz vor einem katastrophalen Beben beteiligt.

"Das ist Erdbebenwetter", sagte ein einheimischer Führer in der Osttürkei zu einem erschrockenen amerikanischen Seismologen, der diese erdbebengefährdete Region besuchte. Innerhalb weniger Stunden folgte ein starkes Beben. Offensichtlich hatte dieser örtliche Führer solche Erdbeben gesehen. Seine Fähigkeit, ein bevorstehendes Beben vorherzusagen, war besser als die der hochentwickelten Instrumente, die zu diesem Zweck eingesetzt wurden.

In römischer Zeit zeigten viele Schriftsteller großes Interesse an Erdbeben und sammelten Berichte über die damit einhergehenden Phänomene. Plinius bespricht in seiner Naturgeschichte Vorboten und bemerkt, dass ein Anzeichen für ein bevorstehendes Erdbeben darin besteht, dass "das Wasser in den Brunnen schlammiger ist und etwas faulig riecht." Er spekuliert weiter, dass Höhlen "einen Auslass für den eingeschlossenen Atem" boten

und dass dort, wo Höhlen keine natürliche Ausstattung der Landschaft waren, konstruierte Tunnel hilfreich waren, um die aufsteigende Luft zu indissipieren. "Gebäude, die von häufigen Kanälen zur Entwässerung durchzogen sind, werden weniger erschüttert", schloss er, ebenso wie solche, "die über Gewölben errichtet sind."

Seneca bemerkte, dass vor einem Erdbeben "gewöhnlich ein brausendes Geräusch von Winden zu hören ist, die eine Störung im Untergrund verursachen." Er fuhr fort zu beobachten, dass "oft, wenn ein Erdbeben auftritt, wenn nur ein Teil der Erde aufgebrochen ist, ein Wind von dort für mehrere Tage weht, wie es - nach Berichten - bei dem Erdbeben geschah, das Chalcis erlitt." Seneca wurde durch eine seismische Erschütterung, die Pompeji sechzehn Jahre vor der noch größeren Katastrophe des Ausbruchs des Vesuvs verwüstete, dazu bewegt, sein Werk über Erdbeben zu schreiben. Ich gebe hier ein eigenartiges Detail wieder, das Seneca anbot und das wir heute so erklären würden, dass es durch einen aufsteigenden Strom von Dämpfen, die reich an Kohlendioxid sind, verursacht wurde.

> Ich habe gesagt, dass eine Herde von Hunderten von Schafen im pompejischen Bezirk getötet wurde.... Die dortige Atmosphäre, die stagniert, ... ist schädlich für diejenigen, die sie einatmen. Oder, wenn sie durch das Gift der inneren Feuer befleckt wurde und von ihrem langen Aufenthalt hinausgeschickt wird, befleckt und verunreinigt sie diese reine, klare Atmosphäre und bietet denen, die die ungewohnte Luft einatmen, neue Arten von Krankheiten.... Es wundert mich nicht, dass Schafe infiziert wurden - Schafe, die eine empfindliche Konstitution haben, je näher sie ihre Köpfe zur Erde trugen, da sie den Afflatus der verdorbenen Luft in Bodennähe erhielten. Wäre die Luft in größerer Menge ausgetreten, hätte sie auch den Menschen geschadet; aber die Fülle der reinen Luft löschte sie aus, bevor sie hoch genug stieg, um von den Menschen eingeatmet zu werden.

Seneca suchte nach einer Erklärung für die Serie von Nachbeben, die beim Erdbeben von Pompeji auftraten und die mehrere Tage lang in ganz Kampanien zu spüren waren. Er schloss daraus, dass nicht die gesamte Luft bei der ersten Eruption ausgestoßen worden war, sondern dass ein Teil noch unter der Erde umherwanderte, obwohl der größere Teil ausgestoßen worden war.

Auch Isaac Newton schloss sich der Ansicht an, dass Erdbeben mit Gasen zusammenhängen. Er schrieb, dass "schwefelhaltige Ströme in den Eingeweiden der Erde reichlich vorhanden sind und mit Mineralien gären, und manchmal mit einer plötzlichen Koruskation und Explosion Feuer fangen, und wenn sie in unterirdischen Kavernen aufgestaut sind, die Kavernen mit einem großen Schütteln der Erde sprengen, wie beim Sprengen einer Mine."[6] Bemerkenswert ist auch, dass die erste Ausgabe der *Encyclopaedia Britannica* von 1771 diesen Eintrag enthielt: "Erdbeben: in der Naturgeschichte eine heftige Erregung oder Erschütterung eines beträchtlichen Teils der Erde, im Allgemeinen begleitet von einem schrecklichen Geräusch wie Donner, und manchmal mit einem Ausbruch von Feuer, Wasser, Wind."

John Michell, ein brillanter Wissenschaftler des achtzehnten Jahrhunderts, leistete einen wichtigen Beitrag zum Verständnis von Erdbeben. Er identifizierte eine Art von Erdbebenstörung, die aus langsamen, ozeanähnlichen Wellen bestand, die tatsächlich beobachtet werden konnten, wie sie sich entlang der Oberfläche des Bodens bewegten - diese "sichtbaren Wellen" können nicht in Form von elastischen Wellenbewegungen erklärt

werden, die viel schneller wären, und es gibt nicht viel Diskussion darüber in modernen seismologischen Texten. Michell versuchte, die Wellen in Form eines Ausbruchs von Dampf zu erklären, und das könnte in der Tat die beste Erklärung sein. Was würde passieren, wenn ein Hochdruckgas aus einer Tiefe von vielen Kilometern, also mit einem Druck von Tausenden von Atmosphären, plötzlich durch Risse im Grundgestein in eine Region unter einer relativ undurchlässigen Bodenschicht freigesetzt würde, die nicht spröde genug ist, um Risse zu bilden? Michell argumentierte wie folgt:

> Angenommen, ein großes Tuch oder ein Teppich (auf einem Boden ausgebreitet) wird an einer Kante angehoben und dann plötzlich wieder auf den Boden gebracht; die Luft darunter, die auf diese Weise angetrieben wird, fließt weiter, bis sie an der gegenüberliegenden Seite entweicht. bis sie an der gegenüberliegenden Seite entweicht und das Tuch in einer Welle den ganzen Weg über anhebt. In ähnlicher Weise kann man sich vorstellen, dass eine große Menge an Dampf die Erde in einer Welle anhebt, während sie zwischen den Schichten entlangläuft, die sie leicht in horizontaler Richtung trennen kann, da es ... wenig oder keinen Zusammenhalt zwischen einer Schicht und einer anderen gibt.[7]

Die Beweise für das Phänomen der sichtbaren Wellen bei zahlreichen Erdbeben in der Antike und in der Neuzeit sind unbestreitbar. Wo ein Erdbeben sowohl auf freigelegtem Grundgestein als auch auf Anschwemmungen zu spüren ist, werden die sichtbaren Wellen nur auf den Anschwemmungen gemeldet. Schwemmland sind die sortierten, zum Teil sehr feinen Sedimente, die im Überschwemmungsgebiet eines großen Flusses oder im Watt abgelagert werden. Die feinkörnige Beschaffenheit der feuchten Sedimente fängt aufsteigende Gase leicht für eine gewisse Zeit ein, und die Geschmeidigkeit des schlammigen Materials ermöglicht ein hohes Maß an Verschiebung, ohne dass es zu Brüchen kommt. In vielen Fällen scheinen die großen Verschiebungen dieser Wellen über weite Teile des Schwemmlandes mehr Zerstörung angerichtet zu haben als die scharfen Stöße des Bebens. Es ist wahrscheinlich, dass die Decke aus Schwemmsedimenten durch aufsteigende Gase tatsächlich vom Grundgestein abgehoben wird, wodurch sie Biegeschwerewellen ausgesetzt ist, genau wie der Teppich in Michells Beispiel.

Michells Aufmerksamkeit wurde durch das katastrophale Erdbeben von Lissabon im Jahr 1755 auf Erdbeben gelenkt, und er stützte sich auf eine große Anzahl von Augenzeugenberichten, die einen Zusammenhang zwischen diesen Erdbeben mit Gas in Verbindung bringen. Er schreibt über die Flammen aus der Erde und den eigentümlichen Nebel, der das Erdbeben von Lissabon begleitete. Michell beschreibt auch Vorläuferphänomene in Jamaika und Neuengland, die zwei oder drei Tage vor den Erdbebenereignissen auftraten; das Wasser von Brunnen wurde schlammig und entwickelte einen schwefeligen Geruch.

Kommen wir zum neunzehnten Jahrhundert, ich werde ein starkes Erdbeben erwähnen, das einen Teil der Vereinigten Staaten heimsuchte und für das die konventionelle Theorie keine gute Erklärung bietet. Dieses Erdbeben war eigentlich eines aus einer Reihe von größeren und vielen kleineren Beben, die sich über einen Zeitraum von mehreren Monaten im Winter 1811-1812 ereigneten. Der Schauplatz war New Madrid, am Westufer des Mississippi in der südöstlichen Ecke von Missouri. Aus der Sicht der in Kapitel 5 vorgestellten Auftriebstheorie der Kohle- (und Sumpf-) Bildung ist es bezeichnend, dass ein Großteil der dortigen Störung in dem als St.-Francis- Sümpfe bekannten Gebiet zum Ausdruck kam. Oberflächenphänomene, die dieses Beben begleiteten, wurden im *Jahresbericht* 1858 der Smithsonian Institution detailliert berichtet.

Am 16. Dezember 1811, um zwei Uhr morgens, wurden die Einwohner von New Madrid durch ein tiefes, donnerndes Geräusch in der Ferne aus ihrem Schlummer geweckt, begleitet von einer heftigen vibrierenden oder oszillierenden Bewegung der Erde von Südwesten nach Nordosten, die zeitweise so heftig war, dass Männer, Frauen und Kinder sich an den nächstgelegenen Gegenständen festhielten, um nicht zu Boden zu fallen.

Es war gefährlich, sich in ihren Behausungen aufzuhalten, da sie fürchteten, diese könnten einstürzen und sie unter ihren Trümmern begraben; es war gefährlich, sich im Freien aufzuhalten, da große Bäume durch die Gewalt der Erschütterungen ihre Wipfel abbrachen und unaufhörlich auf die Erde fielen, oder die Erde selbst öffnete sich in dunklen, gähnenden Abgründen oder Spalten und spuckte schlammiges Wasser, große Klumpen blauen Lehms, Kohle und Sand aus. Als die Gewalt der Erschütterungen vorbei war, stöhnte sie und schlief und sammelte wieder Kraft für eine heftigere Erschütterung.

An diesem Tag wurden achtundzwanzig verschiedene Erschütterungen gezählt, die alle von Südwesten kamen und nach Nordosten verliefen, während die Spalten in die entgegengesetzte Richtung oder von Nordwesten nach Südosten verliefen.

Der Pemiseo-Fluss verlief in südöstlicher Richtung und war wahrscheinlich entweder ein Nebenfluss des St. Francis oder verlor sich in diesen Sümpfen. Dieser Fluss sprengte sich über eine Strecke von fast fünfzig Meilen auf, das Bett wurde vollständig zerstört.... Die Erde öffnete sich bei diesen Explosionen in Spalten von vierzig bis achtzig Ruten [660 bis 1320 Fuß] in der Länge und von drei bis fünf Fuß in der Breite; ihre Tiefe kannte niemand, da niemand die Nervenstärke hatte, sie zu ergründen, und der Sand und die Erde rutschten hinein oder Wasser lief hinein und füllte sie bald teilweise auf.

Große Waldbäume, die in der Spur dieser Abgründe standen, wurden von der Wurzel bis zum Ast gespalten, der Lauf von Bächen wurde verändert, die Böden von Seen wurden von unten heraufgedrückt und bildeten trockenes Land, trockenes Land blies auf, setzte sich ab und bildete Seen mit dunklem, schlammigem Wasser.

Wo an einem Tag die befahrene, ausgetretene Straße verlief, konnte am nächsten Tag eine große Spalte sein, die sie kreuzte, halb gefüllt mit schlammigem, erstarrtem Wasser. Es war gefährlich, nach Einbruch der Dunkelheit zu reisen, denn niemand wusste, welche Veränderungen eine Stunde im Gesicht des Landes bewirken konnte, und doch war der Schrecken so allgemein, dass Männer, Frauen und Kinder ins Hochland flohen, um nicht in einem gemeinsamen Grab verschlungen zu werden. Eine Familie, die sich bemühte, das Hochland auf einem Weg zu erreichen, den sie alle gut kannten, kam unerwartet an die Grenzen eines ausgedehnten Sees; das Land war gesunken, und Wasser war darüber geflossen oder aus der Erde herausgesprudelt und hatte einen neuen See gebildet. Das gegenüberliegende Ufer, davon waren sie überzeugt, konnte nicht weit entfernt sein, und sie fuhren weiter in lauwarmem Wasser, zwölf bis vierzig Zoll tief, mit einer Temperatur von 100 Grad oder über Bluthitze, zeitweise so warm, dass es unangenehm war, vier oder fünf Meilen weit und erreichten das Hochland in Sicherheit.

> Am 8. Februar 1812, dem Tag, an dem die schwersten Erschütterungen stattfanden, schienen die Erschütterungen in Wellen zu verlaufen, wie die Wellen des Meeres, und warfen Ziegelschornsteine in Bodennähe und zwei Ziegelhäuser in New Madrid hinunter, und doch, mit all seinen verwüstenden Auswirkungen, wurde nur eine Person gedacht, die in diesen Erschütterungen verloren wurde. Eine Familie namens Curran war auf dem Weg von New Madrid zu einer alten französischen Stadt am Arkansas River, genannt Port; sie hatten die St.- Francis-Sümpfe durchquert und stellten fest, dass einige ihrer Rinder fehlten; Le Roy, der jüngste Sohn, nahm ein indianisches Pony, ritt zurück, um sie zu jagen, und war im Sumpf, als die erste Erschütterung stattfand; er wurde danach nie wieder gesehen und man nahm an, dass er in einigen dieser schrecklichen Abgründe verloren gegangen war.

Der Smithsonian-Bericht über das New-Madrid-Erdbeben beschreibt auch einige interessante Phänomene (einschließlich Vorläuferphänomene), die zweifellos mit Gasausströmungen in Zusammenhang stehen.

> Am Morgen nach der ersten Erschütterung, als einige Männer den Mississippi überquerten, sahen sie eine schwarze Substanz auf dem Fluss treiben, in Streifen von vier oder fünf Ruten [66-82 ft] in der Breite und zwölf oder vierzehn Ruten in der Länge [198-231 ft], die dem Ruß eines riesigen Schornsteins oder der Schlacke eines gigantischen Ofenrohrs ähnelte. Er war so dick, dass man das Wasser darunter nicht sehen konnte. Auf der Kentucky-Seite des Flusses münden zwei kleine Bäche in den Mississippi, der eine heißt Obine, der andere Forked Deer. Leutnant Robinson, ein Rekrutierungsoffizier der Armee der Vereinigten Staaten, besuchte 1812 den Teil von Kentucky, der zwischen diesen beiden Flüssen liegt, und berichtet, dass er zahllose kleine Hügel in der Erde aufgeworfen fand, und wo ein Stock oder ein abgebrochener Ast eines Baumes quer über diese Hügel lag, waren sie alle in zwei Teilen verbrannt, was den Leuten bewies, dass diese Erschütterungen durch eine innere Feuerwirkung verursacht wurden.
>
> Ungefähr vier Meilen oberhalb von Paducah, am Ohio River, auf der Illinois-Seite, auf einer Pfosten-Eichen-Ebene, wurde ein großes kreisförmiges Becken gebildet, mehr als hundert Fuß im Durchmesser, durch das Absinken der Erde, wie tief kann niemand sagen, da die hohen stattlichen Pfosten-Eichen unter die Wipfel der höchsten Bäume sanken. Die Senke füllte sich mit Wasser, und so geht es bis zum heutigen Tag weiter.

Selbst heute, fast zwei Jahrhunderte später, sind einige dieser Hügel und Senken noch zu sehen. Am auffälligsten sind die so genannten "Sandblasen", trichterförmige Vertiefungen im Schwemmland, in denen Sand unter den Böden und Tonen nach oben und außen geblasen wurde (Abbildung 8.1). Besorgniserregend ist, dass in der Region weitere Sandblasen zu finden sind, deren heutige Vegetation darauf hinweist, dass diese Blasen etwa dreihundert Jahre früher entstanden sind. Das New-Madrid-Erdbeben der aufgezeichneten Geschichte war also nicht das erste. Was könnte die Zukunft bringen?

Wenn wir uns dem zwanzigsten Jahrhundert zuwenden, stellen wir fest, dass viele faszinierende (und einige zweifellos glaubwürdige) Augenzeugenberichte über das große Erdbeben von San Francisco im Jahr 1906 und zahlreiche andere Erdbeben vor allem in der

populären Presse veröffentlicht wurden, und dass diese Berichte dieselbe Art von gasbezogenen Phänomenen beinhalten. Zu den interessantesten gehört ein Bericht über das Erdbeben, das 1975 die Region Hai-cheng im Nordosten Chinas verwüstete. Diese Geschichte ist besonders faszinierend, weil Hai-cheng zwei Stunden vor dem Beben der Stärke 7,3 erfolgreich evakuiert wurde. Wie hätte man es vorhersagen können?

Die meteorologische Station der Provinz Liao-ling berichtete, dass in den Wochen vor diesem Erdbeben die Lufttemperatur in der Nähe der Hai-cheng-Verwerfung höher war als in der umliegenden Region. Dieser Unterschied nahm immer schneller zu, bis zum Tag vor dem Beben, als der Differenz volle 10°C erreichte. Laut dem Bericht der meteorologischen Station,

> Während des Monats vor dem Beben trat in den Gebieten einschließlich Tantung und Liao- yang ein Gas mit einem außergewöhnlichen Geruch auf. Dies wurde von den Menschen als "Erdgas" bezeichnet... eine Person fiel deswegen in Ohnmacht.... Viele Gebiete waren kurz vor dem Beben mit einem merkwürdigen Nebel bedeckt (von den Menschen als "Erdgasnebel" bezeichnet). Die Höhe des Nebels betrug nur zwei bis drei Meter. Er war sehr dicht, von weißer und schwarzer Farbe, ungleichmäßig, geschichtet und hatte auch einen eigenartigen Geruch. Er begann ein bis zwei Stunden vor dem Beben zu erscheinen und war so dicht, dass er die Sterne verdeckte. Nach dem Beben verflüchtigte es sich schnell. Das Gebiet, in dem dieser "Erdgasnebel" auftrat, stand im Zusammenhang mit der Verwerfungszone, die für das Beben verantwortlich war.[8]

Offenbar wurden diese qualitativen Phänomene in Verbindung mit den Temperaturdaten, die auf der Wetterwarte aufgezeichnet wurden, ernst genug genommen, um eine Evakuierung vor dem Beben zu veranlassen.

"Erdgasnebel", der mit einer ausreichend hohen Rate und unter für die Vermischung ungünstigen Bedingungen ausströmt, kann töten. 1986 trat eine Gaswolke (von der man annimmt, dass sie größtenteils aus Kohlendioxid bestand) aus dem Nyos-See aus, einem vulkanischen See in Kamerun, Westafrika. Etwa 1700 Menschen und 3000 Rinder starben an Erstickungsgefahr. Helium-Isotopen-Daten zeigten, dass das Gas aus der Tiefe des Erdmantels aufgestiegen war.[9] Drei Jahre später zeigten Tests, dass der See seine Kohlendioxid-Speicher wieder auffüllte. Vermutlich wird irgendwann in der Zukunft eine weitere Katastrophe eintreten.

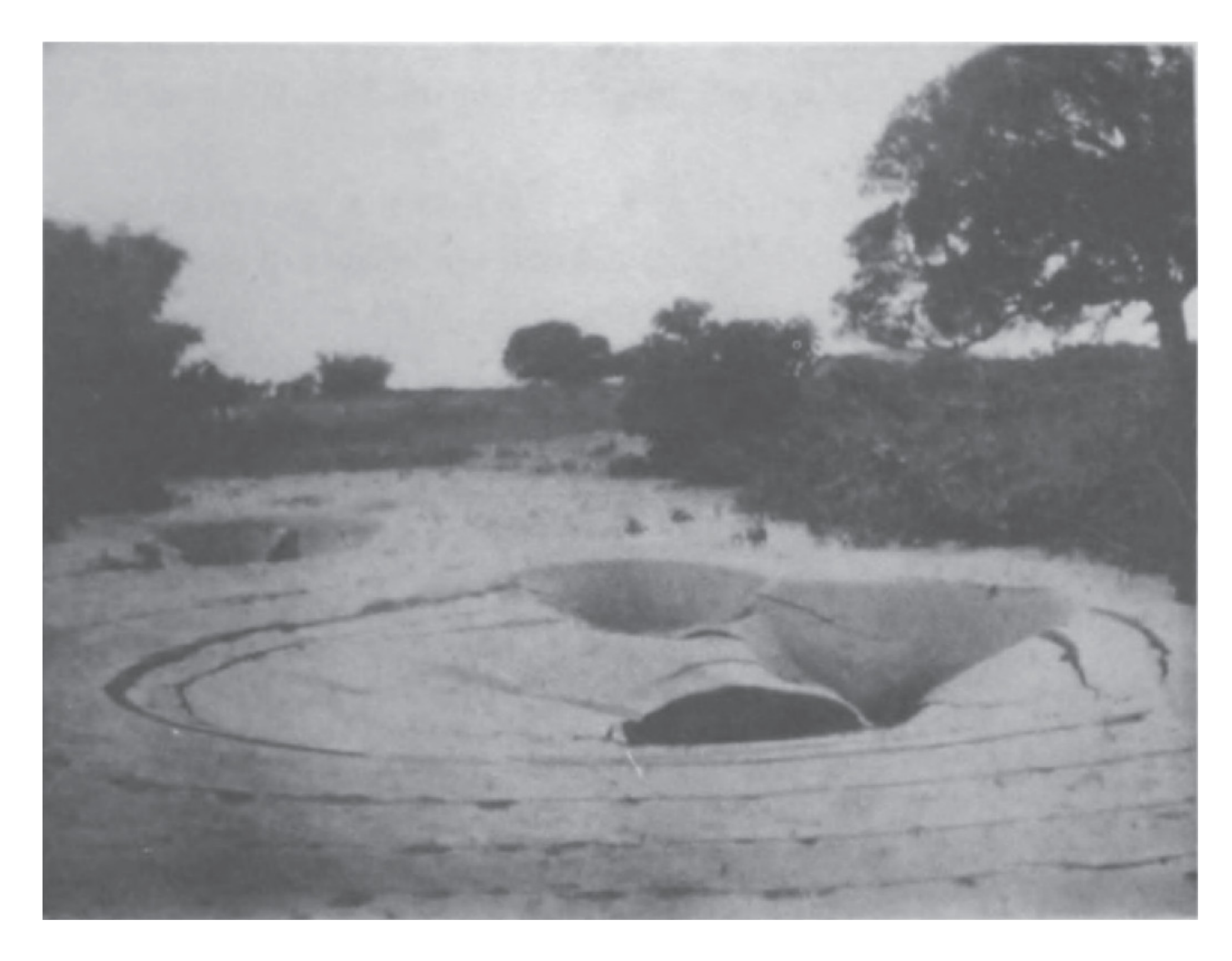


Abbildung 8.1
Sandschlote (Blasen), die denen in New Madrid ähneln, wurden an Orten mehrerer anderer starker Erdbeben beobachtet. Dieses Foto zeigt einen solchen Schlot an der Stelle eines starken Erdbebens in Indien am 12. Juni 1897. Foto von R. D. Oldham.

Gasentladungen aus der Erde, die kurz vor einem Erdbeben auftreten, können zu gering sein, um von Menschen wahrgenommen zu werden, können aber dennoch von Tieren bemerkt werden, entweder durch ihren Geruchssinn oder wenn erstickende Gase unterirdische Höhlen füllen. Seltsames Tierverhalten ist in vielen Berichten über Vorläufereignisse enthalten. Die vielleicht früheste derartige Beschreibung bezieht sich auf das Erdbeben, das im Winter 374-73 v. Chr. die griechischen Städte Helike und Bura an der Südküste des Golfs von Korinth zerstörte. Der römische Schriftsteller Aelian (um 200 n. Chr.) erzählt in seinem Buch Über die Eigenschaften der Tiere die folgende bemerkenswerte Geschichte:

> Fünf Tage lang, bevor Helike verschwand, gingen alle Mäuse und Marder und Schlangen und Tausendfüßler und Käfer und jedes andere Geschöpf dieser Art in der Stadt in einem Körper an der Straße, die nach Carynea führt. Und die Leute von Helike, die dieses Ereignis sahen, waren von Verwunderung erfüllt, konnten aber den Grund nicht erraten. Nachdem aber die besagten Wesen fortgegangen waren, ereignete sich in der Nacht ein Erdbeben; die Stadt stürzte ein, und eine ungeheure Welle ergoss sich über sie, und Helike verschwand.

Aelians eher kuriose Beschreibung eines organisierten Exodus des Ungeziefers der Stadt ist zweifellos eine Übertreibung. Er schrieb schließlich fast sechs Jahrhunderte nach den beschriebenen Ereignissen, was mehr als genug Zeit für die Geschichte war, um die Ausschmückungen der Folklore anzunehmen. Nichtsdestotrotz glaube ich, dass diese Geschichte nicht einfach erdacht wurde. Vielmehr scheint es wahrscheinlich, dass eine höchst ungewöhnliche Störung durch bodenbewohnende Kreaturen einen Eindruck auf die Menschen von Helike machte, bevor das Erdbeben und der Tsunami ihre Stadt zerstörten. Wir kennen inzwischen Hunderte von Berichten über Tiere, die sich vor Erdbeben in ähnlicher Weise verhalten haben. Solche Berichte stammen aus Quellen, die räumlich und zeitlich so weit voneinander entfernt sind wie das antike Griechenland und das moderne China.

Ein aktuelles Beispiel ist der Bericht eines Augenzeugen des katastrophalen Tangshan (China) Erdbebens vom Juli 1976. Der Autor des Berichts und seine Begleiter waren alle Intellektuelle in einem "Umschulungsprogramm" auf einer staatlichen Farm außerhalb von Tangshan. Der Zeitpunkt des seltsamen Tierverhaltens war gegen Mitternacht, etwa vier Stunden vor dem Erdbeben.

> Wir erzählten uns im Schlafsaal Geschichten, als aus dem großen Schlafsaal gegenüber dem unseren Hunderte von Ratten hervorbrachen. Sie schwärmten hin und her, viele kletterten fünf oder sechs Meter an den Wänden hoch, bis sie den Halt verloren. Wir konnten nur zuschauen, bis sie schließlich in der Dunkelheit verschwanden. Während wir darüber staunend nachdachten, drang das Geräusch tausender aufgeregter Hühner und Hähne an unsere Ohren. In der Nähe gab es eine Geflügelfarm, aber niemand konnte sich daran erinnern, jemals die Hähne nachts krähen gehört zu haben. Keiner von uns wusste, dass dieses merkwürdige Verhalten der Tiere die Ankunft eines Erdbebens ankündigte.[10]

Obwohl sie voller Erstaunen waren - wie die Menschen in Helike dreiundzwanzig Jahrhunderte zuvor - waren der Zeuge aus Tangshan und seine Begleiter offenbar nicht sehr bewandert in der Volkskunde. Sie gingen zu Bett, und ein paar Stunden später wurden einige von ihnen getötet, als ihr Schlafsaal zusammenbrach. In der Region kamen mehr als 200.000 Menschen ums Leben.

Erdbebenlöcher und Erdhügel

Es gibt Orte, die sich nicht durch heftige Erdbeben in der aufgezeichneten Geschichte auszeichnen, sondern durch eine stets vorhandene geringe Bebenaktivität. Diese *Erdbebenlöcher* weisen Oberflächenmerkmale und Vorläuferphänomene auf, die die Theorie der aufsteigenden Gase von Erdbeben stark unterstützen.

In Nordnorwegen gibt es einen Erdbebenfleck mit einem Durchmesser von etwa 12 Kilometern, an dem man lange Zeit mit Sicherheit mindestens ein Beben pro Tag erleben konnte. Bei diesen Beben handelte es sich um schwache Beben, die mit den menschlichen Sinnen kaum wahrnehmbar waren. Aber sie konnten nicht auf die übliche Weise erklärt werden. Es war keine Verwerfungslinie vorhanden, auf die man ein Abrutschen des Bodens zurückführen könnte. Der Boden bebte einfach weiter. Eine sehr ähnliche Geschichte kommt von zwei Orten in den Vereinigten Staaten. Der eine, in den letzten Jahren aktive Erdbebenort liegt an der Westspitze des Flathead Lake in Montana. Der andere, der schon seit mindestens achtzig Jahren aktiv ist, befindet sich in Enola, Arkansas.

Erdbebenlöcher lassen sich nicht auf die übliche Weise erklären; sie entstehen eindeutig nicht durch das Aufeinanderschieben von Platten. Erdbebenflecken sind weit entfernt von aktiven tektonischen Strukturen. Es gibt in der Nähe keine abtauchenden Platten des Ozeanbodens oder abgleitende Kontinentalblöcke. Außerdem ist die Bebenaktivität auf kleine Gebiete beschränkt. Es handelt sich um isolierte Flecken/Löcher, nicht um ausgedehnte Regionen mit Bodenerschütterungen.

Ich glaube, dass die Erdbebenlöcher am besten durch die Theorie der aufsteigenden Gase erklärt werden können - ja sogar nur durch diese. Aufsteigende Sporne von leichten Kohlenwasserstoffen, vor allem Methan, zusammen mit begleitenden Gasen wie Kohlendioxid, drängen aus großen Tiefen nach oben. Dabei öffnen und schließen sich immer wieder Risse im Gestein, die den Durchgang dieser unter Druck stehenden Fluide markieren. Sowohl empirische als auch theoretische Überlegungen haben mich zu dieser Schlussfolgerung veranlasst.

Ein weiterer nordamerikanischer Erdbebenherd befindet sich am Nordufer des St. Lawrence River, innerhalb einer Meteoriteneinschlagstruktur namens Charlevoix. Ein großer Meteorit schlug dort vor etwa 350 Millionen Jahren ein und bildete einen Kreis von etwa der gleichen Größe (und dem gleichen Alter) wie der Siljan-Ring in Schweden. Wie bei Siljan schlug der Meteorit in einer Region mit altem Granitgestein ein; Charlevoix liegt innerhalb der geologischen Provinz, die als Kanadischer Schild bekannt ist. Bei Charlevoix treten alle paar Tage spürbare Beben auf, und es werden sehr häufig Mikrobeben registriert. In diesem Fall verkompliziert die Nähe zu Verwerfungslinien, einschließlich der Hauptverwerfungslinie des St. Lawrence River, die Diskussion etwas, da man die Beben auf das Abrutschen von Gestein entlang der Verwerfung zurückführen könnte (und nicht, wie ich vorschlagen werde, auf Gasausströmungen, die sich durch die Verwerfung nach oben arbeiten). Dennoch ist die Konzentration der seismischen Aktivität innerhalb der Grenzen der Impaktstruktur ziemlich offensichtlich.

Ich besuchte Charlevoix bei mehreren Gelegenheiten ab 1988 - nicht wegen der häufigen und anomalen Erdbeben in Charlevoix, sondern weil diese Einschlagstelle ein virtueller Zwilling des schwedischen Siljan-Rings war, der in den fünf Jahren zuvor im Mittelpunkt meiner Aufmerksamkeit gestanden hatte (siehe Kapitel 6). Bei meinem ersten Besuch entdeckte ich, dass die beiden Stätten ein äußerst faszinierendes Merkmal gemeinsam haben: *Erdhügel*. In Charlevoix ragen Gruppen von abgerundeten, steil abfallenden Hügeln abrupt aus einer Schwemmlandebene heraus. Diese Erdhügel sind zwischen 2 und 15 Meter hoch und haben eine horizontale Ausdehnung von bis zu 70 Metern. Sie bestehen im Inneren nur aus dem Lehm und Sand des örtlichen Schwemmlandes, und es gibt keine befriedigende Erklärung für ihren Ursprung.[11]



Abbildung 8.2
Erdhügel auf einem Golfplatz in Charlevoix, Kanada.

Zwei Jahre vor meinem Besuch in Charlevoix hatte Marshall Held, ein wissenschaftlicher Mitarbeiter in meiner Abteilung in Cornell, dieselbe Erdverwerfung beobachtet. Im Jahr 1986 besuchte er die Erdbebenstelle in der Nähe von Enola, Arkansas, und mietete ein Flugzeug, um das Gebiet von oben zu vermessen. Zu seinem Erstaunen sah (und fotografierte) er eine dichte Ansammlung von Hügeln in einer ansonsten glatten Schwemmlandebene. Es wäre ein merkwürdiger Zufall, wenn Erdbeben und Erdhügel nicht miteinander zusammenhängen würden und dennoch gemeinsam auf einem Fleck von nur wenigen Kilometern in Enola, Charlevoix und anderen Erdbebengebieten auftreten würden.

Methan, das aus solchen Erdhügeln austritt, unterstützt die Theorie, dass zumindest in diesen Fällen die aufsteigenden Gase die Ursache für die anhaltenden Beben sind. Die Hügel von Charlevoix müssen sich zwischen dem Ende der letzten Eiszeit (die Gletscher hätten jeden Hügel weggekratzt) und der Entstehung des Golfplatzes. Sie könnten in der Tat repräsentativ für größere Merkmale sein - Schlammvulkane (die bereits besprochen wurden) - die ebenfalls stark mit der Erdbebenaktivität in Verbindung stehen.

Die Hügel an den Erdbebenorten in Charlevoix und Enola könnten auf ähnliche Weise wie die Schlammvulkane entstanden sein, nur in einem kleineren Maßstab. Einige von ihnen haben sichtbare Löcher auf der Oberseite, und in einigen Fällen gibt es Hinweise darauf, dass sich der Boden in jüngerer Zeit verformt hat: Bäume, die an den Seiten der Hügel wachsen, neigen sich alle von der vertikalen Achse nach außen. Im Gegensatz zu Schlammvulkanen deutet die Form dieser Erdhügel darauf hin, dass die Sedimente eher von unten eingewölbt als von oben ausgespuckt wurden. In jedem Fall wären aufsteigen-

de Gase die wahrscheinlichste Ursache, vor allem im Hinblick auf die vorhandenen Gasaustritte.

Aus der Tiefe aufquellendes Gas als Ursache von Erdbeben

Die westliche wissenschaftliche Sichtweise ist, dass Erdbeben durch dieselbe Art von tektonischen Spannungen verursacht werden, von denen man annimmt, dass sie im Laufe der Zeit massive Blöcke von kontinentalen und ozeanischen Platten verschoben haben. Diese Annahme, gepaart mit der Vorliebe für Daten, die von präzisen und unpersönlichen Seismographen gesammelt werden, bedeutet, dass Augenzeugenberichte wie die oben zitierten für westliche Wissenschaftler in der Regel von geringem Interesse sind, und ihre Existenz ist vielen Seismologen nicht einmal bekannt. In China, Japan und der Sowjetunion hingegen wird den Gasphänomenen viel mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Japan hat sogar ein "Labor für Erdbebenchemie". Die Vereinigten Staaten sind auf diesem Gebiet weit zurück, nicht weil es ihnen an der Technologie fehlt, sondern weil sie vor einiger Zeit einen falschen Weg eingeschlagen haben und nicht offen für eine Kursänderung sind.

Sicherlich werden die Bürger in erdbebengefährdeten Regionen aber mehr daran interessiert sein, rechtzeitig gewarnt zu werden, als in einer wissenschaftlichen Kontroverse Partei zu ergreifen. Beobachtungen der Aktivität von unterirdischen Gasen - wie z. B. Veränderungen des Grundwasserspiegels in Wasserbrunnen und Veränderungen der Gaszusammensetzung oder des Drucks über einem Grundwasserspiegel - sind einfach und vergleichsweise kostengünstig zu machen und können objektiv ermittelt werden. Meiner Meinung nach ist es höchste Zeit, dass Kalifornien und die Central Mississippi Region das Wissen und die Erfahrung auf diesem Gebiet erwerben, die eine sinnvolle Vorhersage ermöglichen. Von Wissenschaftlern betriebene Instrumente sollten ein Aspekt eines Frühwarnsystems sein; die Aufklärung der Öffentlichkeit über Erdbeben und ein Meldesystem sollten ein weiterer sein. Beides zusammen würde die größtmögliche Abdeckung für die Beobachtung der vielen Phänomene - sowohl qualitativ als auch quantitativ - sicherstellen, die für die Vorhersage relevant sein können.

Die Fragen der öffentlichen Sicherheit sind zu wichtig, als dass sich die Forschung auf nur eines von zwei vernünftigen Erklärungsparadigmen beschränken sollte. Ich vermute, dass sich im Laufe der Zeit zeigen wird, dass beide Sichtweisen Relevanz haben. Die o l d Theorie (die ich wiederbeleben möchte), das Erdbeben durch die Bewegung und Eruption von Gasen verursacht werden, kann mit der modernen Theorie der Krustenblockbewegungen verschmolzen werden. Zusammen würden sie eine viel bessere Erklärung für alle Phänomene liefern, als es jede der beiden Theorien für sich allein tun kann.

So können Erdbeben am besten durch eine Kombination von Dehnungen in den Gesteinen und aufsteigenden Fluiden verstanden werden.[12] Der Aufbau von Dehnungen in verschiedenen Gesteinen würde ungleichmäßig an verschiedenen Orten und in verschiedenen Tiefen auftreten. Die Dehnungstheorie allein kann jedoch nicht alle Erdbeben erklären, insbesondere solche, die in großer Tiefe auftreten. Gesteine, die tiefer als etwa 60 Kilometer sind, fließen plastisch und brechen nicht plötzlich, wenn eine kritische Spannung überschritten wird. Die innere Reibung, die dem Scherfließen entgegenwirkt, ist größer als jede mechanische Festigkeit. Dennoch sind Erdbeben in Tiefen von bis zu 700 Kilometern, also tief im Erdmantel, bekannt. Ein kürzlich aufgezeichnetes Beben (8. Juni 1994) mit einer Stärke von 8,2 auf der Richterskala kam aus einer Tiefe von 600 Kilometern unter Bolivien. Offensichtlich muß dort unten ein anderer Prozeß ablaufen, nicht nur die

Scherung der Platten. Die Ursache für diesen Prozess zu finden, könnte der Schlüssel zum Verständnis aller Erdbeben sein.

Meiner Meinung nach kann nur das Vorhandensein und der schnelle Fluss großer Mengen von Gas dafür verantwortlich sein, die innere Reibung in der Tiefe aufzuheben. In geringeren Tiefen unterstützt das Eindringen von Gasen von unten und öffnet Risse, wodurch das spröde Gestein schlagartig geschwächt wird. Mit abnehmender Bruchfestigkeit erreicht das Gestein die Versagensgrenze, und es kommt zu einem Erdbeben. Die gleiche Flüssigkeitsmasse kann auf ihrem Weg nach oben weiterhin Erdbeben auslösen, da Schicht um Schicht weniger durchlässiges Gestein angetroffen wird, kompromittiert und dann gebrochen wird. Es ist also nicht ein Anstieg der Spannung in der Region, der das Erdbeben auslöst, sondern ein plötzlicher *Abfall der Festigkeit des Gesteins*.

Es ist also nicht verwunderlich, dass sich durch die Messung der Dehnungen vor einem großen Beben kaum Anhaltspunkte finden lassen. Außer der Aufblähung von Porenräumen wird zu diesem Zeitpunkt nichts Nennenswertes im Spannungsfeld passiert sein. Eine Ausbeulung der Oberfläche nach oben könnte messbar sein, aber Ausbeulungen sind schwer zu beobachten, außer an der Meeresküste (wo sie in der Tat manchmal als Vorläufer bemerkt wurden), oder in jüngster Zeit mit dem *Global Positioning System*. Eine solche Aufblähung führt möglicherweise nur zu einer sehr geringen horizontalen Verformung auf oder nahe der Oberfläche, die auf Dehnungsmessstreifen zu erkennen wäre. Wenn die Regionen, die aufgeblasen werden, groß sind, werden auch Neigungsbeobachtungen nicht viel bringen. Andererseits können die direkten gasbedingten Phänomene über die gesamte Region, unter der sich das Gas verteilt hat, deutlich zu sehen sein.

Wonach sollten wir genau suchen? Das Austreten von Gas, das von einer darunter liegenden größeren Gasmasse durch kleine Porenräume getrieben wird, wird der erste Hinweis sein, der beobachtet werden kann. In oberflächennahen Schichten kann dies durch Störungen des Grundwassers und daraus resultierende Änderungen der elektrischen Ströme, die dieses Grundwasser führt, sowie durch Änderungen in der Zusammensetzung des Gases, wenn Komponenten aus tieferen Schichten hochgebracht werden, signalisiert werden.

Ungewöhnliche Geräusche können die Folge sein. Es kann sogar zu messbaren Veränderungen der seismischen Geschwindigkeiten kommen, da sich die Porenräume vergrößern und das Gestein dadurch kompressibler wird. Und ja, wir sollten auf unregelmäßiges Verhalten unserer Haustiere achten, deren Nasen empfindlicher sind als unsere, und auf die Tiere, die in Höhlen und Tunneln unter der Oberfläche leben, wo sich die Zusammensetzung der Gase plötzlich ändern und für tierisches Leben ungeeignet werden kann (Abbildung 8.3).

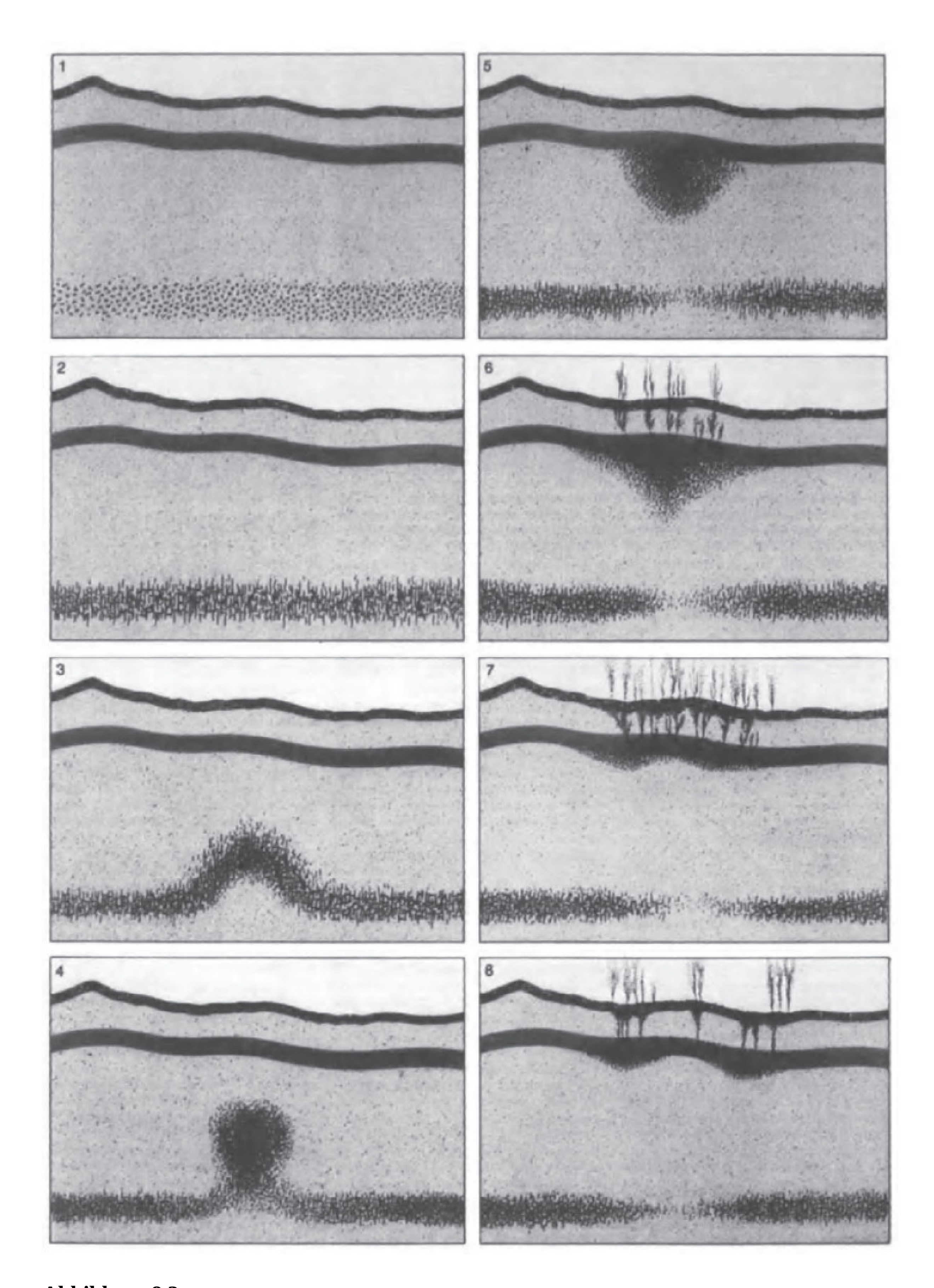


Abbildung 8.3
Aufsteigende Fluide als Ursache von Erdbeben. Fluide, die aus dem ursprünglichen Gasspeicher der Erde freigesetzt werden, einschließlich Kohlenwasserstoffen in einer Tiefe

von vielleicht 150 Kilometern, schaffen Porenräume in der umgebenden Matrix aus heißem Gestein (1). Da das Gestein in solchen Tiefen heiß genug ist, um sich plastisch zu verformen, dehnen sich die Porenräume aus, oft allmählich und ohne die Erschütterungen eines Erdbebens auszulösen (2). Aber die Instabilität der leichten Fluide in den dichteren Gesteinen ist nicht erleichtert (3, 4), und die Fluide werden weiter nach oben getrieben. In flacheren Schichten, wo das Gestein härter und nicht mehr plastisch ist (dunkles Band in 5), verursachen die Fluide einen Sprödbruch des Gesteins. Kleine Risse, die durch den Druck der Fluide verursacht werden, entstehen und wachsen und schwächen das Gestein. Mit abnehmender Endfestigkeit erreicht das Gestein schließlich die Versagensgrenze, was das Erdbeben auslöst. Nicht ein kritischer Spannungsanstieg des Gesteins war die unmittelbare Ursache des Bebens, sondern die schnelle Schwächung der Festigkeit des Gesteins löste das Beben aus (7). Gas, das in einer größeren Region um das Epizentrum vorhanden ist und zum Zeitpunkt des Ereignisses nicht entweicht, schwächt weiterhin andere Gesteine, bis auch diese nachgeben. Dies erklärt die übliche Ausdehnung des Gebiets bei Nachbeben. QUELLE: Nach Thomas Gold und Steven Soter, 1980. "The deep-earth gas hypothesis", *Scientific American* 242: 154-61.

Verbesserte Methoden zur Erdbebenvorhersage sind also ein Nutzen, den wir aus der Auftriebsgas-Theorie der Erdbebenentstehung ziehen können. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass diese Theorie unter Erdbebenspezialisten große Aufmerksamkeit erregt, solange die zugrunde liegende Tiefengastheorie nicht breiter diskutiert wird.

Wie in Kapitel 7 erwähnt, könnten die Tiefengas-Theorie und vielleicht auch ihr Begleiter, die Theorie der tiefen heißen Biosphäre, neue Wege zum Verständnis der Entstehung wertvoller Mineralvorkommen eröffnen. In früheren Kapiteln wurden die tiefgreifenden Veränderungen in der Erdölgeologie vorgestellt, die ein solches neues Paradigma erfordern würde, zusammen mit den tiefgreifenden Veränderungen, die es in unserem Verständnis des Lebens innerhalb der Erde erfordern würde. In den letzten beiden Kapiteln werden die eher spekulativen Implikationen der beiden Theorien untersucht. Wie könnten die Perspektiven des tiefen Erdgases und der tiefen heißen Biosphäre unsere wissenschaftlichen Ansichten über den Ursprung des Lebens auf der Erde verändern? Und was bedeuten diese beiden miteinander verbundenen Theorien für unsere Chance, Leben anderswo im Sonnensystem anzutreffen?

Kapitel 9

Ursprung des Lebens

Die Erde beherbergt nicht nur einen, sondern zwei große Bereiche des Lebens: das Leben an der Oberfläche, das durch Photosynthese gespeist wird und uns allen vertraut ist, und das Leben in der Tiefe, das durch chemische Energie gespeist wird, die von unten nach oben gedrungen ist. Wir haben gerade erst begonnen, die Bewohner und die Reichweite des Tiefenreichs zu erforschen. Ich vermute, dass die Erforschung des Lebens in der Tiefe so lange spärlich und weitgehend unangekündigt bleiben wird, bis die Mikroben aus der Tiefe als Vertreter einer ganz eigenen Biosphäre wahrgenommen werden und nicht als isolierte und geniale Anpassungen des Lebens an der Oberfläche, die die Grenzen der Bewohnbarkeit verschieben. Wenn der Perspektivwechsel jedoch stattfindet, wird eine wahre Explosion neuer Ideen zwei der spekulativsten und zugleich philosophisch interessantesten Themen der Wissenschaft durchdringen: den Ursprung des Lebens und die Aussichten auf außerirdisches Leben.

Detaillierte chemische Analysen zeigen, dass Ausprägungen des Lebens im Oberflächenbereich und im Tiefenbereich mit ziemlicher Sicherheit einen gemeinsamen Ursprung haben, da beide das gleiche genetische System besitzen. Ob das gemeinsame genetische System auf eine gemeinsame Panspermie - den Transport von biologischem Material von anderen Himmelskörpern zur Erde - zurückzuführen ist, oder ob das Leben in einem der beiden Bereiche auf diesem Planeten entstanden ist und dann Anpassungen entwickelt hat, die es ihm ermöglichten, den anderen Bereich zu besiedeln, wissen wir noch nicht mit Sicherheit.

Wenn der Ursprung des Lebens auf der Erde tatsächlich terrestrisch war, dann würden wir bestimmen wollen, in welchem der beiden Reiche es entstanden ist. Eine Möglichkeit, diese Untersuchung zu beginnen, ist die Suche nach Abhängigkeiten zwischen den beiden Bereichen. Kontakt zwischen der Oberfläche und der Tiefe ist sicher vorhanden gewesen, aber Kontakt ist etwas ganz anderes als Abhängigkeit. Wenn wir Beweise für eine solche Abhängigkeit des einen Bereichs vom anderen finden können, aber nicht für ihre gemeinsame Abhängigkeit, haben wir ein starkes Argument dafür, dass das Leben im unabhängigen Bereich entstanden ist und sich später im abhängigen Bereich ausgebreitet hat. Wenn aber keine ausgeprägte Abhängigkeit gefunden werden kann, dann müssen wir nach anderen Überlegungen suchen, die anzeigen, in welche Richtung die Evolution gegangen ist.

Es gibt (noch) keine Hinweise auf die Art dieser Abfolge oder auf die Beziehung, die diese beiden Reiche im Laufe der Zeit zueinander hatten. Möglicherweise sind sie gegenwärtig im Wesentlichen unabhängig voneinander. Wenn zum Beispiel das gesamte photosynthetische Leben an der Oberfläche verschwinden würde, könnte das Leben im tiefen Untergrund im Wesentlichen so weitergehen wie bisher. Wenn aus irgendeinem Grund das Leben in der Tiefe verschwinden würde, wüssten wir keinen Grund, warum dies einen großen Einfluss auf das photosynthetische Leben an der Oberfläche haben sollte - zumindest auf kurze Sicht. (Langfristig könnte es einen Unterschied machen, weil es gelegentlich zu einem vorteilhaften Austausch von genetischem Material zwischen dem mikrobiellen Leben in der Tiefe und dem Leben an der Oberfläche kommen kann).

Bewohnbarkeit des Lebensraums auf der Erde und in der Tiefe

Ein fruchtbarer Weg, sich der Frage nach dem Ursprung des Lebens zu nähern, ist der Vergleich der Bewohnbarkeit der beiden Reiche. Das Leben an der Oberfläche, das wir kennen, ist enorm reichhaltig aufgrund der großen Menge an Energie, die die Sonne photosynthetischen Mikroben und, Äonen später, photosynthetischen Algen und Landpflanzen zur Verfügung gestellt hat. Diese Organismen haben hochentwickelte Apparate zur Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Formen entwickelt, von denen sie und der Rest der Nahrungskette der Oberflächenbiosphäre dann abhängen. Die Photosynthesizer haben sich an das Fehlen von Energie während der Nacht und während der jahreszeitlich verlängerten Nächte in hohen Breiten angepasst. Von Zeit zu Zeit muss das Leben an der Oberfläche mit einem weitaus schwerwiegenderen Problem zurechtkommen: der Blockade des Sonnenlichts für Zeiträume von Monaten oder mehr nach schweren Vulkanausbrüchen und gelegentlichen Einschlägen von großen Asteroiden. Mikroben können diese Katastrophen in einem ruhigen Zustand abwarten, aber globale Populationen der Makroflora und -fauna können durch diese Ereignisse ernsthaft herausgefordert werden, was zu großen Aussterbeereignissen führt.

Ist die Energieversorgung, die die tiefe, heiße Biosphäre unterstützt, demselben Risiko der Veränderung und Blockierung ausgesetzt? Wir wissen nicht, wie beständig und lang anhaltend die aufsteigenden Kohlenwasserstoffströme an einem bestimmten Ort sind, aber ich vermute, dass sie über Millionen von Jahren sehr konstant sind. Es ist unwahrscheinlich, dass eine Störung den gesamten unterirdischen Bereich des Planeten auf einmal betrifft. Da die Biosphäre in der Tiefe (mit Ausnahme des Lebens in den Randbereichen, wie z. B. den ozeanischen Schloten) vollständig mikrobiell ist, dürften lange erzwungene Ruhephasen keine große Herausforderung darstellen. Auch die Einschläge großer Asteroiden könnten die Oberfläche verwüstet haben, insbesondere vor 3,8 Milliarden Jahren. Aber solche Einschläge könnten der unterirdischen Biosphäre sogar zugutegekommen sein, indem sie neue Risse für das Aufsteigen von Kohlenwasserstoffen öffneten und mikrobielles Leben gedeihen ließen.

Wie verhalten sich die beiden Reiche im Hinblick auf die für das Leben geeignete Temperatur? Wie in Kapitel 2 erläutert, werden Temperaturen, die Wasser an der Erdoberfläche zum Kochen bringen würden, von Mikroben in der Tiefe problemlos toleriert, da der hohe Druck den Siedepunkt von Wasser erheblich anhebt. Flüssiges Wasser ist also in der Tiefe in einem größeren Temperaturbereich verfügbar als an der Erdoberfläche. Mit Ausnahme von Gebieten mit aktivem Vulkanismus bleibt der Temperaturgradient des Erduntergrundes in jeder Tiefe konstant; es gibt kein "Wetter" unter der Oberfläche und keine Gletscherschübe oder kochendes Wasser. Dies steht in scharfem Kontrast zu den Bedingungen an der Oberfläche - insbesondere an Land -, wo enorme Temperaturschwankungen saisonal und sogar täglich auftreten können. Damit die Oberfläche über den langen Zeitraum der Erdgeschichte bewohnbar geblieben ist, müssen die Temperaturen innerhalb eines schmalen Bandes geblieben sein, in dem Wasser bei dem Druck, den die Erdatmosphäre bietet, flüssig bleiben kann.

Ein großer Vorteil für das Leben in der Tiefe ist der Schutz, den das Gestein vor der harten ionisierenden Strahlung sowohl von der Sonne als auch aus dem Weltraum bietet. Wir Oberflächenbewohner neigen dazu, zu vergessen, dass das Leben an der Oberfläche Schutzschichten und Pigmente entwickelt hat, um schädliche Sonnenstrahlen abzuwehren, sowie DNA-Reparaturmechanismen, um die Schäden durch solare und kosmische Strah-

lung rückgängig zu machen, die nicht vollständig vermieden werden können. Aber keine dieser Anpassungen hätte den allerersten Lebensformen zur Verfügung gestanden - den allerersten Versuchen von zellulärem Leben. Im Gegensatz dazu bieten die Bedingungen im Untergrund eine viel angenehmere Situation. In der Tiefe besteht keine Notwendigkeit für komplexe Moleküle, sich gegen die Strahlung zu verteidigen, die die Oberfläche bombardiert. Es stimmt, dass harte ionisierende Strahlung durch den radioaktiven Zerfall von Kalium, Uran und Thorium auch in der Tiefe vorhanden wäre. Diese Strahlungen würden jedoch das Gestein mit einer viel geringeren Rate durchdringen als an der Oberfläche, und die Strahlungen würden über lange Zeiträume konstant bleiben.

Schließlich ist der wichtigste Unterschied zwischen der tiefen heißen Biosphäre und der Oberflächenbiosphäre als Bereiche für den Ursprung des Lebens die Fülle an Urenergie, die von unten heraufströmt - und, was ebenso wichtig ist, aus einer Tiefe, die so weit entfernt ist, dass die Quelle selbst für das Leben unzugänglich ist. Erinnern Sie sich daran, dass die erste lebende Zelle den Akt der Photosynthese nicht hätte durchführen können. An der Oberfläche würde eine große chemische Energiezufuhr also erst beginnen, nachdem einige Organismen die komplexen Vorgänge der Photosynthese entwickelt hatten. Davor wäre der spontane Zusammenbau von Molekülen, die energiebringende Reaktionen eingehen können, ein seltenes Ereignis gewesen, und die Konzentration solcher Moleküle in einer "Ursuppe", die vielleicht in einem Gezeitentümpel herumschwappte, wäre noch seltener gewesen. Sollte unter solchen Umständen ein sich selbst erhaltendes und sich selbst reproduzierendes System komplexer Moleküle entstanden sein, was wäre dann mit dieser Pionierform des "Lebens" geschehen, wenn die gesamte Nahrung mit der exponentiellen Geschwindigkeit, mit der sich lebende Systeme reproduzieren, aufgebraucht worden wäre? Es ist nicht klar, wie diese "Schlemmen und Hungern"-Situation vor dem Aufkommen der Photosynthese hätte vermieden werden können oder wie ein langer und detaillierter evolutionärer Prozess hätte aufrechterhalten werden können.

Schon allein aus diesem Grund ist der Untergrund der wahrscheinlichere Ort für die frühen Phasen des Lebens, wenn die Tiefseegastheorie zutrifft. Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten, die von unten nach oben strömen und aus Tiefen stammen, die für kohlenstoffbasiertes Leben viel zu heiß sind, um sie zu erreichen und zu plündern, könnten über lange Zeiträume hinweg Nahrung in gleichmäßiger, dosierter Menge geboten haben. Dieses Szenario würde ideale Bedingungen für das Entstehen und Gedeihen von Leben bieten. Später hätten dieselben Bedingungen mikrobielles Leben in die Lage versetzt, eine Reihe von chemischen Fähigkeiten zu entwickeln.

Fähigkeiten zu entwickeln. Bewegliche Abenteurer am äußeren Rand des unterirdischen Bereichs - vielleicht in der Nähe von Schloten in der Tiefsee - könnten wärmeempfindliche Pigmente entwickelt haben, mit denen sie sich in Richtung des energiereichen Schlots orientieren und so verhindern, dass sie in den kargen, kalten Ozean verschleppt werden. Es wurde vermutet, dass der erste wichtige Schritt zur Photosynthese die Orientierung und Navigation durch die Wahrnehmung von Wärmestrahlung war.[1] Die Photosynthese wäre gefolgt, wenn einige Mikroben es für vorteilhaft hielten, an oder nahe der Oberfläche zu leben und ihre Energiequellen durch die Nutzung des Sonnenlichts anzureichern.

In der anderen Richtung, von der Oberfläche zum Leben in der Tiefe, sehe ich keine ähnlich günstige Situation. Die Photosynthese müsste sich in einem sehr frühen Schritt aus einer Evolution entwickeln, die davon abhängig ist, dass eine nicht näher spezifizierte Form von chemischer Energie an der Oberfläche kontinuierlich zur Verfügung steht. Die

Progression müsste dann die Form einer Invasion des Untergrundes annehmen, die Entwicklung einer Fähigkeit, die dort verfügbaren chemischen Energiequellen zu nutzen, und eine Anpassung an die erhöhten Temperaturen und den extremen Druck in diesem Bereich.

Der unterirdische Bereich scheint daher aus einer Reihe von theoretischen Gründen der wahrscheinlichere Ort für die anfängliche Entwicklung dieser merkwürdigen und extrem aufwendigen chemischen Prozesse zu sein, die wir Leben nennen. Die Druck- und Temperaturbedingungen im Untergrund sind gleichmäßiger und im Allgemeinen lebensfreundlicher als die Bedingungen an der Oberfläche. Unterirdisches Leben hätte große Asteroideneinschläge nicht nur toleriert, sondern wahrscheinlich sogar von der Störung profitiert. Die für das Leben schädliche Strahlung wäre in der Tiefe stark reduziert worden. Schließlich wäre nach der Tiefengas-Theorie chemische Energie im Überfluss vorhanden gewesen und als dosierter Fluss geliefert worden.

Empirische Unterstützung für den unterirdischen Bereich als Entstehungsort des Lebens findet sich in Form von vielen neueren Taxonomische Analysen, die hyperthermophile Archaeen und Bakterien als die am tiefsten verwurzelten" Lebensformen identifizieren. Es ist natürlich möglich (wenn auch meiner Meinung nach sehr unwahrscheinlich), dass die Erdoberfläche vor etwa drei Milliarden Jahren nur für die höchst wärmeliebenden Lebensformen geeignet war. Die tiefe Verwurzelung der extremen Thermophilen könnte auch auf die heißen Ozeanschlote als Ursprungsort des Lebens hindeuten. Aber was wäre die Quelle chemischer Energie gewesen, wenn nicht aus der Tiefe aufsteigende Flüssigkeiten, die in Reaktionen mit den auf ihren Wegen vorhandenen Stoffen Energie gewinnen konnten? Die empirischen Beweise schließen zwar Hypothesen nicht aus, die einen Ursprung des Lebens an der Oberfläche postulieren, unterstützen aber dennoch stark die Behauptung eines unterirdischen Ursprungs.

Die größere Wahrscheinlichkeit für den Ursprung des Lebens

Die Tiefseegastheorie ist eine Voraussetzung für die Ansicht, dass das Leben auf der Erde in der Tiefe entstanden ist. Der Untergrund bietet nicht nur einen günstigeren Lebensraum für frühes Leben, sondern vergrößert auch den Bereich, in dem chemische "Experimente" stattgefunden haben könnten, beträchtlich. Dieser Zuwachs an Volumen und Masse - insbesondere der kohlenstoffhaltigen Moleküle - erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein günstiges Zusammentreffen chemischer Reaktionen und ein Nebeneinander komplexer Moleküle - die Vorläufer des Lebens - zufällig stattgefunden haben könnte, erheblich.

Es ist vielleicht ganz falsch zu glauben, dass es einen eindeutigen Anfang des Lebens gab. Möglicherweise gibt es einen schrittweisen Weg zur Komplexität sehr einfacher Lebensformen, bei dem kein einzelner Schritt als derjenige angesehen werden kann, der lebende von nicht- lebender Materie abgrenzt. Leben stellt vielleicht nicht mehr dar als die Prozesse, die in den Physik- und Chemie-Lehrbüchern beschrieben sind, angewandt unter Umständen, die weit außerhalb des Rahmens unserer Vorstellungskraft liegen. Wir müssen daher die Wahrscheinlichkeit oder Unwahrscheinlichkeit der Bildung eines bestimmten Moleküls oder einer Struktur anhand der Anzahl von Experimenten beurteilen, die in den für die frühe Erde charakteristischen chemischen Medien stattgefunden haben könnten - und das in Zeitspannen von Hunderten von Millionen Jahren. Ein Prozess, der für das Auftreten eines einzelnen Schrittes zu Recht als höchst unwahrscheinlich eingestuft wer-

den würde, hätte dennoch eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass er stattfindet, wenn das Experiment, das ihn hervorbringen könnte, sehr oft wiederholt würde.

Nehmen wir an, wir beginnen mit der Vielfalt von Atomen (oder davon abgeleiteten Molekülen), die wir in Flüssigkeiten in den tieferen Gesteinen sehen: Kohlenstoff, Hydrogen, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Natrium, Kalium, Kalzium und einige andere Metalle, die aus den Gesteinen stammen. (Ich werde diese Mischung als "Suppe" bezeichnen.) Wie viele Reaktionen würden hier stattfinden, die neue Moleküle erzeugen könnten? Der unterirdische Bereich bietet in dieser Hinsicht zwei grundlegende Vorteile gegenüber dem Oberflächenbereich. Erstens würde der Druck viele Moleküle stabilisieren, die an der Oberfläche nicht existieren könnten. In der Tiefe wäre also mehr Neuartiges möglich, bei gleichem Ausgangsgebräu. Zweitens würden die höheren Temperaturen in der Tiefe alle Reaktionen beschleunigen und somit mehr Kombinationsmöglichkeiten bieten, als ein ähnliches Volumen an Suppe an der Oberfläche in der gleichen Zeitspanne erzeugen würde.

Wie könnte sich das Volumen der Suppe zwischen der Oberfläche und dem Untergrund unterscheiden? Die Befürworter der Oberflächensicht auf die Entstehung des Lebens gehen nicht davon aus, dass die gesamte Erdoberfläche vor 3,5 oder 4 Milliarden Jahren von einer lebenserzeugenden Suppe überschwemmt war. Vielmehr könnten ihrer Ansicht nach Moleküle, die als Vorläufer für lebende Stoffwechsel- und Replikationssysteme dienen könnten, sporadisch durch Zufall hergestellt worden sein und sich dann in schwappenden und verdampfenden Gezeitentümpeln oder entlang von Schloten des tiefen Meeresbodens konzentriert haben, wo heiße Flüssigkeiten in eine kühle und chemisch ausgeprägte Umgebung spucken. Nach der Gas-Tiefentheorie der Erde müssten die aufsteigenden Kohlenwasserstoffe jedoch schon seit der Akkretion des Planeten und dem Beginn der gravitativen Sortierung die Porenräume der Erdkruste mit einer Fertigsuppe durchtränkt haben. Das Volumen der Suppe, das für präbiologische Experimente zur Verfügung steht, wäre also praktisch das gesamte Volumen der Porenräume, die durch die aufsteigenden Fluide innerhalb der Erdkruste offen gehalten werden.

Um das mögliche Volumen zu berechnen, gehen wir von einem vernünftigen Tiefenintervall aus, sagen wir von knapp unter der Oberfläche bis hinunter zu 10 Kilometern, in dem die chemische Suppe Porenräume füllen könnte, die 1 Prozent des Gesteinsvolumens ausmachen. Das Gesteinsvolumen würde $5{,}1 \times 10^{18}$ Kubikmeter betragen; 1 Prozent wäre also $5{,}1 \times 10^{16}$ Kubikmeter oder eine Suppenmasse in der Größenordnung von $5{,}1 \times 10^{16}$ Tonnen. Diese Suppenmasse würde etwa 4 Prozent der gesamten Masse der heutigen Erdozeane ausmachen.

Gehen wir davon aus, dass das mittlere Molekulargewicht der Suppe 50 atomare Masseneinheiten beträgt. Das wären zum Beispiel zwei Kohlenstoffatome (24), ein Sauerstoffatom (16) und zehn Wasserstoffatome (10). Fünfzig atomare Masseneinheiten unterscheiden sich nicht allzu sehr von dem Molekulargewicht heutiger Flüssigkeiten, die aus solchen Tiefen hochgezogen werden. Dann würden $5{,}1 \times 10^{16}$ Tonnen eine Anzahl solcher Moleküle in der Größenordnung von 6×10^{44}

Wie viele chemische Reaktionen würden in der Suppe ablaufen? Hier wird die Berechnung sehr spekulativ. Wir können ableiten (wie in Kapitel 3 erläutert), dass die Suppe, da sie aus einer Quelle im Erdmantel stammt, die nicht bis zum chemischen Gleichgewicht erhitzt und vermischt wurde, Energie besitzt, die auf natürliche Weise viele chemische

Prozesse in Gang setzen kann, die sie näher an das chemische Gleichgewicht bringen. Nehmen wir an, dass jedes einzelne Molekül die Chance hat, einmal pro Tag eine Modifikation zu erleiden. Eine solche Modifikation könnte nur thermisch induziert sein, oder sie könnte aus zufälligen Begegnungen von Molekülen resultieren, die miteinander reagieren werden. In einer Milliarde Jahren wird es dann 3,6 X 10^{11} Modifikationen für jedes zu Beginn vorhandene Vorgängermolekül gegeben haben, bei einer Gesamtmasse von 6 x 10^{44} solcher Moleküle, also insgesamt etwa 2 x 10^{56} solcher Modifikationen.

Diese große Zahl würde nur dann Bedeutung erlangen, wenn ein spezielles, für das Leben entscheidendes Molekül aus der Menge der anderen hervorgehen würde. Wie können wir die Möglichkeit einschätzen, dass dies geschehen könnte? Wahrscheinlichkeiten, die so klein sind, dass das spezielle Molekül nur einmal in 10^{56} Experimenten vorkommt, liegen nicht in dem Bereich, in dem wir ein kompetentes, intuitives Urteil haben. Vielleicht hilft aber eine Analogie weiter. Stellen Sie sich vor, Sie werfen eine Münze in Sätzen von 100 Würfen. Nachdem Sie die ersten hundert geworfen haben, entscheiden Sie sich, weitere hundert zu werfen Hundert, und dann noch eine, bis Sie schließlich einen Satz werfen, bei dem alle hundert Würfe Kopf ergeben. Wenn Sie durchschnittliches Glück haben, müssten Sie diesen Satz von Würfen 10^{30} Mal durchführen, um einen einzigen Satz mit Kopf zu erzielen. Wenn Sie nun 10^{56} Gelegenheiten bekämen, das gleiche Experiment beim Münzwurf durchzuführen, könnten Sie erwarten, dass Sie im Durchschnitt 8 x 10^{22} perfekte Sätze aller Köpfe produzieren.

Man könnte dies auch im Sinne der traditionellen Diskussion über hohe Unwahrscheinlichkeiten formulieren - also wie viele Affen mit Schreibmaschinen man bräuchte, um ein Werk von Shakespeare zu duplizieren. Wie sich herausstellt, entspricht unsere Zahl 10^{56} in etwa der Anzahl der Affen, die benötigt werden, um nur die erste Zeile eines bestimmten Shakespeare- Sonetts zu kopieren.[2] Würden wir stattdessen 10^{57} Affen einsetzen, könnten wir mehrere Fälle von Erfolg erwarten. Das absurd unwahrscheinliche Ereignis wäre hochwahrscheinlich geworden.

Ob die Zahlen, die ich in meiner Berechnung der molekularen Wahrscheinlichkeiten verwendet habe, tatsächlich korrekt sind, weiß ich nicht. Aber was auch immer die richtige Wahl der Zahlen sein mag, es ist sicher, dass sie uns immer noch in diesen undurchschaubaren Bereich der großen Zahlen führen würden - und damit in eine Situation, in der Ereignisse eintreten werden, die einzeln als so extrem unwahrscheinlich eingestuft worden wären, dass ihre Eintrittswahrscheinlichkeit nicht beachtet werden würde. Aber sie können in der Tat auftreten, angesichts dieses Hintergrunds der stetigen Veränderungen in Massen über Massen von Molekülen über eine sehr lange Zeitspanne. In der Tat, sie können hohe Wahrscheinlichkeiten des Auftretens haben.

Dennoch kann man sich fragen, wozu es gut sein soll, dass das magische Molekül nur einmal in einer Milliarde Jahren inmitten einer solchen Masse von nutzlosen Gefährten ins Dasein getreten ist. Die Antwort ist, dass ein einziges Molekül tatsächlich in kurzer Zeit die Population der gesamten Suppe dominieren kann - wenn dieses spezielle Molekül ein Autokatalysator ist. Ein Autokatalysator ist ein Molekül, das nicht nur für die Katalyse einer bestimmten Reaktion verantwortlich ist, sondern auch dafür, dass ein anderes Molekül wie sich selbst dazu bringt, sich aus Bestandteilen der Suppe zu bilden. Ein gewöhnliches katalytisches Molekül erleichtert die Bildung eines anderen Moleküls. Ein Autokatalysator stimuliert die Bildung einer Kopie von sich selbst.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass in allen Fällen die durchschnittliche Generationszeit für ein einzelnes Molekül zur Bildung eines neuen Moleküls einen Tag beträgt. Nach einem Tag wird das gewöhnliche katalytische Molekül ein Molekül einer anderen Art synthetisiert haben. Nach zwei Tagen wird es ein weiteres synthetisiert haben, so dass es insgesamt zwei synthetisierte Moleküle gibt. Am Ende des dritten Tages werden es drei solcher synthetisierten Moleküle sein, am vierten Tag vier, und so weiter. Im Gegensatz dazu wird die Population der Autokatalysatoren exponentiell wachsen, von zwei am Ende des ersten Tages auf vier am Ende des zweiten Tages, dann auf 16, 32 und so weiter. Dieses schnelle zahlenmäßige Wachstum, das dem autokatalytischen Prozess innewohnt, macht seinen Fortgang unanfällig für Unfälle. Der Verlust eines einzelnen autokatalytischen Moleküls in einer großen Menge solcher Moleküle ist kein großer Rückschlag. Findet dagegen der Einzelkatalysator am fünften Tag ein vorzeitiges Ende, kommt der gesamte Prozess zum Stillstand.

Die Anzahl der Nachkommen des autokatalytischen Moleküls ist dann durch 2^n gegeben, wobei n die Anzahl der vergangenen Generationen ist. Nehmen wir 50 Generationen - in unserem Modell 50 Tage - an, in denen der gewöhnliche Katalysator 50 Moleküle produziert hätte. In der gleichen Zeitspanne hätte der Autokatalysator 2^{50}, also 10^{15}, Nachkommen produziert. In 188 Generationen (in unserem Beispiel immer noch nur 188 Tage) würde die Zahl 4 X 10^{56} erreichen - was, wie wir uns erinnern, die Gesamtzahl der Moleküle in der gesamten Suppe ist. In der Praxis wird es einen Mangel an einigen Komponentenatomen des autokatalytischen Moleküls geben, lange bevor die gesamte Suppe in Klone dieses beschäftigten Moleküls umkonfiguriert ist, so dass der Prozess weit vor dem totalen Verbrauch der Suppe aufhören wird. Nichtsdestotrotz wird dieser autokatalytische Prozess alle anderen chemischen Prozesse leicht dominieren, nachdem er mit einem einzigen Molekül begonnen hat, dessen Wahrscheinlichkeit, sich zu bilden, als extrem gering angesehen werden könnte. Je umfangreicher das Volumen der Suppe ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Bildung eines Moleküls, das die komplexen Anforderungen der Autokatalyse erfüllt, und desto höher sind die Chancen einer weiteren Entwicklung aus diesem Stadium. Die Schichten der Kruste, in Kombination mit dem Fluss der Fluide, die Energie liefern können, indem sie mit den Festkörpern auf ihren Wegen Reaktionen eingehen, sind die größte solche Domäne, die die Erde besitzt. Diese Domäne sollten wir dann auch als erstes für den Ursprung des Lebens in Betracht ziehen.

Wir können autokatalytische Prozesse leicht identifizieren, wenn ein Molekül in der nächsten Generation ein solches produziert. Aber ein Prozess gehört auch dann zum mathematischen Regime der Autokatalyse, wenn er den ersten Typ erst in einer späteren Generation reproduziert, nachdem er in der Zwischenzeit eine oder mehrere Zwischenstufen produziert hat. Diese Zwischenstufen verlangsamen den Prozess, aber die zugrunde liegende Exponentialkurve wird schließlich immer noch alle konkurrierenden Prozesse ausstechen. Wir können von Autokatalysatoren verschiedener Ordnungen sprechen: Die erste Ordnung reproduziert sich einfach selbst. Die zweite Ordnung produziert sich wieder selbst, aber erst nachdem eine andere Form dazwischen kommt. Eine dritte Ordnung hat zwei Formen dazwischen, und so weiter.

Aber beschreibt diese Darstellung nicht das Wesentliche des Lebens? Jede Form produziert wieder einen Autokatalysator, den wir den *Genotyp* nennen werden, die Einheit, die die Anweisungen für die Gestaltung der nächsten Generation enthält. Dazwischen liegt eine weitere Stufe - der Phänotyp -, der dann den Genotyp hervorbringt, wie der, von dem er abstammt. Der nächste Genotyp setzt dann den Prozess fort. Pflanzen und Tiere (wie

wir selbst) sind die dazwischenliegenden Phänotypen. Aber die Mathematik der Reproduktion wird immer noch dem Exponentialgesetz folgen. Mit der Kraft dieses Exponentialgesetzes im Rücken würde jede biologische Ordnung ohne weiteres gegenüber jeder konkurrierenden, die diesen mathematischen Vorteil nicht genießt, dominant werden. Alle Reproduktion in der Biologie unterliegt dem Exponentialgesetz, selbst wenn sie für eine Spezies ungünstig ist, wie es der Fall ist, wenn sie zu der Katastrophe "Schlemmen und Hungern" führt.

Ein Autokatalysator zweiter oder höherer Ordnung stellt für die Stufe "Phänotyp" eine Möglichkeit dar, Veränderungen zu unterstützen, die die autokatalytische Fähigkeit des nächsten Genotyps nicht zerstören, aber dennoch die vorgenommenen Veränderungen weiterführen. An diesem Punkt tritt die darwinistische Logik in das System ein, und Veränderungen, die "vorteilhaft" sind, indem sie die Überlebenschance des Genotyps oder des Phänotyps erhöhen oder seine Reproduktionsrate steigern, werden andere Veränderungen ausstechen.

Hat diese Diskussion das Problem der Entstehung des Lebens gelöst? Das glaube ich nicht. Was sie uns gesagt hat, ist, dass die grundlegenden Systeme der mehrfach wiederholten Selbstreproduktion bereits in Molekülen vorhanden sein können, die in dem vorkommen, was wir unbelebte Natur nennen würden; vielleicht kommen sie sogar häufig vor. Damit haben wir die Voraussetzungen für eine Evolution geschaffen, die nun der lenkenden Kraft der darwinistischen natürlichen Selektion unterliegt und sich, so verstärkt, zu viel größerer Komplexität sowohl der Struktur als auch der Chemie ausweiten kann.

Die selbstreplizierenden Moleküle sind ein Schritt in Richtung der Evolution des Lebens, aber unsere Definition von Leben beinhaltet im Allgemeinen das Vorhandensein von Zellen. Vielleicht ist dies ein Fehler unsererseits. Viren sind Einheiten des Lebens, aber nur solche, die zelluläre Organismen als Wirte benutzen und dadurch Veränderungen oder Schäden an ihnen verursachen, sind identifiziert. Es mag eine große Anzahl ähnlicher nicht-zellulärer Organismen geben, die chemische Energiequellen aus ihrer Umgebung nutzen, die entweder biologischen oder nicht-biologischen Ursprungs sein können. Wenn sie keine offensichtlichen Veränderungen verursachen, würden sie uns keinen Hinweis auf ihre Existenz geben. Dennoch könnten sie die frühen Formen des Lebens repräsentiert haben und immer noch ein Hauptbestandteil sein.

Zellen scheinen eine Notwendigkeit für die komplexeren, aufwendigeren Lebensformen zu sein. Wie konnten sich Zellen überhaupt bilden? Viele Forscher haben betrachten den Schritt zur Bildung von Zellen als den kritischen Schritt, den essentiellen Schritt zum Eintritt in die Evolution komplexer Lebensformen. Aus diesem Grund werde ich einen möglichen Weg zur Bildung von Zellwänden anbieten, die das genetische (autokatalytische) Molekül umgeben. Es sind viele Mikroben bekannt, die Wasser um sich herum haben, das sie durch ein gallertartiges Mittel einschließt und festhält. Das nicht-zelluläre Leben könnte eine solche Fähigkeit bereits entwickelt haben, und der nächste Schritt könnte die Verdampfung von Wasser von den äußeren Oberflächen dieses Schleims sein, wodurch sich das Material im Schleim konzentriert und eine Haut bildet. Wenn sich dies für den Organismus als hilfreich erweist, kann er sich weiterentwickeln und dem umgebenden Schleim Materialien hinzufügen, die am besten geeignet sind, um eine dauerhafte Haut zu bilden. Wenn erst einmal Moleküle von großer Komplexität im Spiel sind, ist es kein großer Schritt, dass diese sich mit einer Zellwand umschließen.

Darwins Dilemma

Seit Charles Darwins Lebzeiten und bis heute plagt ein Problem seine schöne Theorie. Die allmähliche Evolution, die durch gelegentliche zufällige Fehler in den genetischen Bauplänen impliziert wird, sollte Beweise für viele Zwischenformen in der Evolution einer Spezies hinterlassen, einige, die in der entstandenen Evolutionslinie liegen, und einige, die in einer Sackgasse gelandet sind. Aber das ist nicht das, was der Fossilbericht zeigt. Vielmehr zeigt er lange Perioden mit wenig oder keiner Veränderung und dann einen fast augenblicklichen Übergang zu einer anderen Form. Es wurde argumentiert, dass dieses Muster der biologischen Evolution auf seltene, aber schnelle Veränderungen in der Umwelt zurückzuführen sein könnte (möglicherweise durch größere Schwankungen des Klimas oder der atmosphärischen Zusammensetzung oder durch Vulkanausbrüche), die eine schnelle Anpassung des Lebens zu solchen Zeiten erzwangen. Zwischen diesen Veränderungen gab es wenig zu gewinnen durch zufällige Veränderungen, und die Darwinsche Selektion hätte dazu tendiert, sie zu verhindern. Diese Sichtweise der biologischen Evolution wird allgemein als "punktuelles Gleichgewicht" (punctuated equilibrium) bezeichnet.

Vielleicht wird Darwins Dilemma tatsächlich durch einen Wechsel von Stillstand und Veränderung in der Umwelt aufgelöst. Ich persönlich glaube das nicht, obwohl ich glaube, dass die Umwelt durchaus solchen punktuellen Bedingungen unterworfen gewesen sein kann. Aber selbst wenn es Perioden gab, in denen eine schnelle Anpassung erforderlich war, könnten zufällige Veränderungen und die zahlreichen erforderlichen Selektionsprozesse so wenig Zeit in Anspruch genommen und so wenige Beispiele für Zwischenschritte hinterlassen haben? Würde dies bei vielen verschiedenen Arten zu unterschiedlichen Zeiten geschehen? Das jedenfalls ist die Art der Frage, die bleibt.

Darwin war sich über die Ursache der Variationen, die seine Theorie erforderte, nicht sehr sicher. Die meisten Forscher, die ihm folgten, nahmen an, dass es sich um zufällige Variationen handeln müsse, um Ungenauigkeiten in den Bauplänen, die zur Erzeugung der nächsten Generation geliefert wurden. Sicherlich konnten sie solche Fehler in vielen Fällen identifizieren, und sie fanden diese Fehler meist dadurch, dass sie ihr nachteiliges Ergebnis feststellten. Aber könnte es eine andere Ursache für genetische Veränderungen geben als zufällige Fehler, eine Ursache, die große Veränderungen auf einmal bewirken könnte? Wenn ja, könnte das Problem des Fehlens von Zwischenformen vielleicht erklärt werden.

Die zufällige Mutation scheint ein adäquater Mechanismus zu sein, um evolutionäre Veränderungen in zwei der drei taxonomischen Domänen des Lebens zu erklären - den Archaeen und den Bakterien. Diese Organismen haben hohe Reproduktionsraten, und die Anzahl in jeder Generation ist enorm groß. Die Wahrscheinlichkeit, in einer bestimmten Zeitspanne durch zufällige Fehler auf eine günstige Mutation zu stoßen, ist gegeben durch die Anzahl der lebenden Vertreter einer Art, geteilt durch die Zeitdauer des Reproduktionszyklus. Darin ist der Unterschied zwischen Elefanten und Bakterien enorm.

Betrachten wir die evolutionären Fähigkeiten des am meisten untersuchten Bakteriums der Erde, *E. coli.* Im Verdauungstrakt eines jeden Menschen gibt es etwa 10^{12} *E. coli*-Bakterien, die für die chemische Verarbeitung unserer Nahrung unerlässlich sind. Die menschliche Bevölkerung besteht, aufgerundet auf die nächste Größenordnung, aus 10^{10} heute lebenden Personen, so dass die Anzahl der E. coli, die allein von der Menschheit

getragen werden, etwa 10^{22} beträgt. Ein Bakterium, das entsprechend ernährt wird, vermehrt sich etwa alle 20 Minuten. Vergleichen Sie nun das Reproduktionspotenzial von *E. coli* mit dem von Elefanten. Es gibt vielleicht 100.000 Elefanten, die heute leben, und ihre Reproduktionszeit beträgt 10 Jahre. Die Bakterien vermehren sich 262.800-mal so schnell, und es gibt 10^{17}-mal so viele in nur dem einen Lebensraum (dem menschlichen Darm), den wir erwähnt haben. Die Chance, in einer gegebenen Zeitspanne auf eine günstige Mutation zu stoßen, ist also für diese Bakterien 2,6 x 10^{22} mal größer als für die Elefanten.

Zufällige Mutationen und ihre Selektion könnten also durchaus der Weg zu großen evolutionären Neuerungen bei den verschiedenen Linien von Mikroorganismen sein, während sie bei großen Lebewesen hoffnungslos langsam sind. Wie sich herausstellt, unterscheiden sich große Lebewesen stark in ihrer Form, aber nicht so sehr in ihrer Funktion. Eine Maus, ganz zu schweigen von einem Frosch, mag ganz anders aussehen als ein Elefant, aber alle Wirbeltiere teilen sich dieselben Zelltypen, dieselben Arten von Molekülen. Die Innovationen bei der Makrofauna liegen nicht im Design der Standard-Zelltypen der Tiere, sondern in der Anordnung der Zellen und in der Geschwindigkeit und Anzahl der Reproduktionszyklen, die aufrechterhalten werden. Mikroben zeichnen sich durch ihre metabolische Vielfalt aus, während Eukaryoten die Vorreiter der Form sind.

Eine methanfressende, wärmeliebende Mikrobe mag einer photosynthetischen Mikrobe sehr ähnlich sehen, aber die evolutionären Unterschiede sind viel größer als die, die Quallen und Menschen trennen. Lynn Margulis und andere haben überzeugende empirische Beweise und theoretische Argumente dafür geliefert, dass wichtige Innovationen im Stoffwechsel fast ausschließlich von den mikrobiellen Domänen erzielt wurden. Die eukaryotische Domäne, die schließlich die gesamte Makrofauna abgespalten hat, hat einfach das, was sie brauchte, von den Mikroben durch Endosymbiose erworben - das heißt, durch die Aufnahme von Mikroben, die dann integraler Bestandteil der eukaryotischen Zelle wurden. Tatsächlich nimmt man an, dass der gesamte eukaryotische Bereich mit der symbiotischen Verschmelzung von mindestens zwei metabolisch unterschiedlichen Linien von Mikroben begonnen hat.

Die Endosymbiose wird heute als ein entscheidendes und radikales Mittel akzeptiert, mit dem evolutionäre Innovationen über Linien hinweg weitergegeben werden. Ein solcher Austausch kann für plötzliche Sprünge in der Empfängerlinie verantwortlich sein, auch wenn die mikrobielle Linie, die ursprünglich das metabolische Talent entwickelt hat, viel Zeit gebraucht haben mag, um es zu verwirklichen. Ein anderer Weg für den Austausch von Fähigkeiten ist jetzt ein großes Unternehmen in unseren biomedizinischen und landwirtschaftlichen Laboratorien. Dies ist die Kunst des Genspleißens. Könnten natürlich vorkommende Methoden des Genspleißens eine wichtige treibende Kraft der Evolution gewesen sein, und könnten sie zu viel schnelleren Übergängen und weniger Zwischenschritten geführt haben, als es einzelne Zufallsmutationen erfordert hätten? Diese Möglichkeit wurde in letzter Zeit von Experten auf diesem Gebiet ernsthaft untersucht.[3] Dennoch ist eine kleine müßige Spekulation eines Nicht- Experten vielleicht interessant.

Die darwinistische Logik würde nicht nur für die Evolution von Stoffwechsel und Körperformen gelten, sondern auch für die Evolution der genetischen Systeme, die beiden zugrunde liegen. Wenn also eine Übertragung von Genen von einem Organismus auf einen anderen im Allgemeinen eher eine Hilfe als ein Hindernis wäre, hätte sich das genetische System - das von den bevölkerungsreichen und produktiven Mikroben entwickelt wurde - sicherlich darauf eingestellt, dies zu ermöglichen. Selbst eine winzige Wahr-

scheinlichkeit, dass etwas genetisches Material von *mikrobiologischen* Linien auf *makrobiologische* Linien übertragen wird, könnte ein wichtiger - sogar ein dominanter - Mechanismus für die *makrobiologische* Evolution sein.

Um diesen Punkt zu illustrieren, lassen Sie uns zu unserem Vergleich von Elefanten und Bakterien zurückkehren. Ein Enzym, vielleicht ein Molekül von großer Komplexität, das in der Lage ist, eine nützliche Funktion in bestimmten Stoffwechselprozessen zu erfüllen, könnte von einer Linie von Mikroben als Ergebnis einer langen Abfolge von Zufallsmutationen "erfunden" werden. Wenn diese aufeinanderfolgenden zufälligen Schritte vielleicht hundert Jahre brauchen würden, um irgendwo in der großen Population der Mikroben aufzutreten, würde dies 10^{18} Jahre - eine Milliarde Milliarden Jahre - bedeuten, damit die gleiche chemische Evolution bei Elefanten stattfindet (und ähnliche Zeiten für jede makrobiologische Form). Mit anderen Worten: Es würde nie passieren. Wir müssen nun überlegen, ob es in der Natur Mechanismen für das Genspleißen gibt, die zwar ungeheuerlich unwahrscheinlich erscheinen, aber dennoch ein Molekül aus den Mikroben in einem akzeptablen Zeitrahmen für die Evolution in das genetische Material der Makroorganismen bringen könnten.

Es scheint also, dass alles ausgeklügelte "Design" durch eine Abfolge von Zufallsmutationen zu den beiden taxonomischen Bereichen der Mikrobiologie gehört. Mutationen in der Makrobiologie können immer noch ein bedeutender Faktor für einfache Designänderungen (einschließlich Formänderungen) sein, obwohl schädliche Zufallsmutationen häufiger vorkommen. Chemische Veränderungen können durchaus das Tragen mehrerer Zwischenformen erfordern, die keinen Zweck erfüllen, bevor die nützliche Form zusammengesetzt wird, und das würde die Wahrscheinlichkeit stark verringern und daher die benötigte Zeit stark verlängern. Meiner Meinung nach kann nur die mikrobielle Welt die Anzahl an Experimenten bieten, die solch bedeutende Arten von Innovationen erfordern. Das Genspleißen würde dann den besten Weg bieten, damit auch die makrobiologische Welt davon profitieren kann.

In der modernen Biotechnologie sehen wir die beiden Methoden am Werk. Die gezielte Auslese, die aus einem Wolf einen Pekinesen oder eine Dogge gemacht hat, oder einen Mais, der zwei- oder dreimal so viel Ertrag bringt wie seine Vorfahren, ist eine Methode, die in der Landwirtschaft immer noch sehr verbreitet ist. Pflanzenstämme, die gegen bestimmte Insekten oder Krankheiten resistent sind, wurden auf diese Weise erzeugt; Hunde, Pferde, Kühe, Schweine und andere Tiere wurden erfolgreich auf Eigenschaften gezüchtet, die für ihre Besitzer wünschenswert sind. Doch schon jetzt zeichnet sich eine Konkurrenz zu der anderen Methode der Modifikation ab: der Methode, die auf Genspleißung basiert. Wir können zum Beispiel gengespleißte Tomaten kaufen, die eine erhöhte Resistenz gegen Fäulnis aufweisen. Durch Genspleißen können Pharmafirmen menschliches Insulin aus Schweinen gewinnen. Es wird erwartet, dass viele weitere solcher Vorteile aus den laufenden Experimenten hervorgehen werden. Die Landwirtschaft wird in der Lage sein, ohne die chemische Unterstützung, die sie heute zur Abwehr von Insektenbefall und Krankheiten benötigt, effizient zu bleiben, weil die Pflanzen und Tiere selbst mit Genen ausgestattet sind, die sie mit der Fähigkeit ausstatten, diesen Schädlingen zu widerstehen. Wie lange wird es dauern, bis wir krankheitsresistente Gene in den Menschen einbauen und unsere Abhängigkeit von Medikamenten und medizinischen Behandlungen verringern werden?

Wenn wir glauben, dass genetisches Material auf natürliche Weise von einer Spezies auf eine andere übertragen werden könnte, dann bekommt das ganze Thema der Symbiose - die Beziehung einer Reihe von verschiedenen Lebewesen, die zu ihrem gegenseitigen Nutzen zusammenleben - eine neue Bedeutung. Könnten solche Kolonien dazu gekommen sein, ihr genetisches Material zusammenzulegen? Wenn ja, dann würden sie durch diesen einen Akt zu einem neuen, komplexen, differenzierten, mehrzelligen Organismus werden. Ich weiß nicht, wie weit man diesen Gedankengang treiben sollte. Ist ein komplexes Tier der Nachkomme einer symbiotischen Anordnung der Vorläufer der einzelnen Organe?[4]

Symbiose, Endosymbiose und Gen-Splicing sind allesamt Wege, um evolutionäre Innovationen horizontal über große Zweige der gesamten Vielfalt des Lebens zu verbreiten. Damit diese Arten des Austauschs stattfinden können, muss jedoch eine grundlegende Kompatibilität in der genetischen Struktur vorhanden sein. Dies bringt mich zum letzten Thema des Kapitels: molekulare Chiralität.

Viele der Moleküle in biologischem Material können in zwei Konfigurationen existieren, die genaue Spiegelbilder voneinander sind. Von diesen Molekülen sagt man, dass sie Chiralität besitzen. Ein chirales Molekül kann entweder in einer rechtshändigen oder einer linkshändigen Form auftreten. Die Doppelhelix der DNA zum Beispiel ähnelt einer Wendeltreppe mit Handläufen auf jeder Seite. Theoretisch könnte sich die Treppe entweder nach rechts oder nach links winden, und diese Richtungsabhängigkeit würde gelten, egal von welcher Seite man die Treppe betrachtet. In der Praxis weisen alle DNA-Moleküle eine rechtshändige Chiralität auf. Warum diese Gleichförmigkeit in allen Bereichen des irdischen Lebens?

Eine rechts-links-symmetrische Beziehung kann nicht in zwei Dimensionen definiert werden, also kann Chiralität nur in Molekülen mit drei Dimensionen existieren. Für beliebige drei Punkte können wir immer eine Ebene wählen, die durch sie hindurchgeht, so dass ein Molekül, das nur aus drei Atomen besteht, nur zwei Dimensionen hat. Ein dreiatomiges Molekül wird immer mit seinem Spiegelbild identisch sein, von der einen oder anderen Seite aus gesehen. Es kann keine Chiralität besitzen. Moleküle, die vier oder mehr Atome besitzen können dreidimensional oder nicht dreidimensional sein und daher chiral oder nicht chiral sein. Bei chiralen Molekülen in einer Flüssigkeit kann beobachtet werden, dass sie die Ebene von planar polarisiertem Licht, das durch sie hindurchgeht, in die eine oder andere Richtung drehen. So können die Moleküle die Ebene rechts- oder linkshändig rotieren. Diejenigen, die ersteres tun, erhalten das Präfix R; diejenigen, die letzteres tun, L.

Es gibt viele chirale Moleküle oder Kristallstrukturen nicht-biologischen Ursprungs, die natürlich vorkommen. Aber in nicht-biologischen Materialien treten die beiden Formen in statistisch gleicher Anzahl auf. In biologischen Materialien ist das nicht so. Wie bereits erwähnt, ist alle DNA spiralförmig nach rechts gewunden. Einige der Aminosäuren, die die Grundbausteine von Proteinen bilden, sind ebenfalls chiral, und diese zeigen eine linkshändige Chiralität für alles bekannte irdische Leben - von Bakterien bis hin zu Elefanten und uns. Theoretisch würde eine rechtshändige Form eines bestimmten Proteins in allen Fällen, in denen alle wechselwirkenden Moleküle durch ihre Spiegelbilder ersetzt worden wären, genau die gleichen chemischen Reaktionen durchführen. Mit anderen Worten: Chemische Reaktionen bevorzugen nicht eine Chiralität gegenüber einer ande-

ren. Warum haben dann nicht einige Zweige des Lebens ihre Proteine auf die R-Struktur umgestellt?

Eine offensichtliche Antwort ist, dass die gesamte Biologie aus demselben Ursprung hervorgegangen sein muss. Diese erste Zelle - oder was auch immer sie war - legte die Spielregeln für alle Zeiten fest. Die Wahl der chiralen Richtung war willkürlich, welche Form dieser Vorläufer auch immer zufällig traf, mit einer 50:50 Chance. Alles, was sich davon ableitete, wie weit die Evolution auch immer fortgeschritten sein mochte, unterlag dann weiterhin den Zwängen dieser ersten Selektion.

Linus Pauling, einer der großen Chemiker des zwanzigsten Jahrhunderts, äußerte seine Zweifel an dieser Antwort:

> Alle untersuchten Proteine, die von Tieren und von Pflanzen, von höheren Organismen und von sehr einfachen Organismen - Bakterien, Schimmelpilze, sogar Viren - gewonnen wurden, sind wurden aus L-Aminosäuren hergestellt. Es wurde die Vermutung geäußert, dass der erste lebende Organismus zufällig einige Moleküle der L-Konfiguration nutzte, die statistisch gesehen in gleicher Anzahl wie die anderen vorhanden waren, und dass alle nachfolgenden Lebensformen, die sich entwickelt haben, weiterhin L-Aminosäuren durch Vererbung des Charakters von der ursprünglichen Lebensform nutzten. Vielleicht lässt sich eine bessere Erklärung finden - aber ich weiß nicht, welche es ist.[5]

Niemand kann Paulings Gedanken zu der Zeit erahnen, als er dies schrieb, aber ich kann mir vorstellen, dass er nicht glauben konnte, dass die Vererbung im Laufe der Evolution so präzise sein würde, dass die große Vielfalt des Lebens niemals unabhängige Zweigsysteme entwickeln würde, die von diesem definierten Muster der Chiralität abweichen. Das wäre jedenfalls mein Vorbehalt gewesen, der auch zu der Hoffnung führt, dass eine bessere Erklärung gefunden werden kann. Vielleicht liefert der Vorteil des Genspleißens die bessere Antwort.

Wenn das Genspleißen eine Hauptquelle für die in den Evolutionsprozess eingebrachten Variationen war, dann würde jede Linie, die zur entgegengesetzten Chiralität mutierte, auf alle zukünftigen Gelegenheiten verzichten, die Vorteile von Innovationen zu erhalten, die von irgendeinem anderen Zweig des Lebens erreicht wurden. Die abweichende Linie wäre von der Unterstützung abgeschnitten und würde früher oder später so weit hinter dem Rest zurückbleiben, dass die Selektion sie zum Aussterben bringen würde.

Wenn Genspleißen und verschiedene Formen von symbiotischen Fusionen zwischen weit voneinander entfernten Linien tatsächlich eine wichtige Rolle in der Evolution des Lebens auf der Erde gespielt haben, dann sollten wir die enorme Vielfalt des Lebens im Laufe der Zeit nicht als einen evolutionären "Baum" beschreiben, bei dem jeder Zweig für sich allein voranschreitet und sich zu einzelnen Arten entwickelt. Vielmehr sollten wir an eine kombinierte Evolution der irdischen Biologie denken, in der alle weiterhin eng miteinander und mit dem produktivsten Genpool von allen - dem der Mikroorganismen[6] - verbunden sind. Weil die tiefe heiße Biosphäre meiner Meinung nach so riesig ist und weil dieser Bereich höchstwahrscheinlich die ersten lebenden Systeme genährt hat, haben viele der Innovationen und Gen-Tausch- und Verschmelzungsereignisse, die die heutigen Ausprägungen des Lebens unterstützen, wahrscheinlich stattgefunden, lange bevor es Leben auf der Oberfläche der Erde gab. Vielleicht sind solche Errungenschaften noch im Gange.

Kapitel 10

Wie geht es weiter?

Ein primordialer Ursprung terrestrischer Kohlenwasserstoffe und eine Quelle dieser Kohlenwasserstoffe in großer Tiefe, die Nahrung für eine lebhafte Mikrobiologie in geringerer Tiefe bietet - das ist der Standpunkt, für den hier viele Beweise vorgelegt wurden. Es ist jedoch klar, dass zusätzliche Bestätigungen für die Theorie der tiefen Erdgase und der tiefen heißen Biosphäre erforderlich sind, bevor sie allgemein akzeptiert werden. Es können verschiedene Arten von Untersuchungen durchgeführt werden, um solche bestätigenden Beweise zu erhalten.

Die Tiefen-Erdgas-Theorie wurde bereits durch das in Kapitel 6 beschriebene Bohrexperiment bestätigt. Die geologische Struktur des Siljanringes in Schweden wurde als Standort für dieses Experiment gewählt, weil es sich um eine reine Granitprovinz handelt, so dass ein dort in der Tiefe entdecktes Gas nicht durch die biogene Theorie der Bildung von Kohlenwasserstoffen erklärt werden kann. Tatsächlich wurden Methan und schwerere Kohlenwasserstoffe entdeckt - und zwar in einer Tiefe von mehr als 6 Kilometern. Die Tiefengastheorie war damit meiner Meinung nach bestätigt. Dennoch müssen noch mehr solcher anomaler Funde hinzukommen, bevor die bestehende biogene Theorie von denen aufgegeben wird, die diese Theorie jetzt unhinterfragt akzeptieren.

Eine weitere Möglichkeit, die biogene Theorie zu widerlegen, wären Messungen, die in bestehenden Gasfeldern durchgeführt werden können. Es wurden viele Beobachtungen von Kohlenwasserstoffen an der Erdoberfläche aufgezeichnet. "Kaltes Petroleum Sickersäcke" auf den Kontinentalschelfen und Blöcke aus Methanhydrat-Eis, die sich durch den Ozeanboden nach oben drücken und weite Teile der arktischen Tundra bedecken, wurden in Kapitel 2 beschrieben. Die La Brea Teergruben in Südkalifornien, berühmt für die braun gefärbten Knochen von Säbelzahntigern und anderen großen Säugetieren aus dem Pleistozän, sind ein weiteres Beispiel. An Orten, an denen Kohlenwasserstoffe gasförmig und mit hoher Geschwindigkeit aus der Kruste in die Atmosphäre sickern, sind die Ausdünstungen nicht sichtbar und riechen möglicherweise nicht, aber es können Flammen erscheinen und verschwinden.

Genaue Messungen der Gasaustrittsraten, insbesondere über Regionen, in denen Erdgas kommerziell gefördert wird, könnten Daten liefern, die mit der biogenen Theorie der Kohlenwasserstoffbildung nur schwer zu erklären wären. Sollte sich herausstellen, dass das Volumen und die Sickerrate von Kohlenwasserstoffgasen, die in solchen Regionen in die Atmosphäre gelangen, so groß sind, dass die darunter liegenden Gasreservoirs beispielsweise in wenigen tausend Jahren auf natürliche Weise erschöpft wären, müsste die herkömmliche Theorie der mehrere Millionen Jahre alten Gasfelder aufgegeben werden. Man müsste anerkennen, dass z. B. die Methanmoleküle, die jetzt in einer Lagerstätte aus der späten Kreidezeit enthalten sind, nicht schon seit 70 oder 80 Millionen Jahren einfach so da liegen.

Der Kohlenwasserstoffgehalt dieser Lagerstätte müsste auf eine vorübergehende Ansammlung eines kontinuierlichen Aufwärtsstroms aus einer sehr weit entfernten und viel tieferen Quelle zurückgeführt werden. Daraus könnte man schließen, dass die Ressource im Laufe der Zeit enorm produktiver wäre als bisher angenommen. Ein weiterer Stein

wäre aus dem Fundament entfernt, das die Theorie stützt, dass Kohlenwasserstoffe die überarbeiteten Überreste von Organismen sind, die an der Erdoberfläche lebten und starben, dann zusammen mit Sedimenten dieses bestimmten Alters begraben wurden und schließlich durch mysteriöse geologische Prozesse zu Kohlenwasserstoffen verkocht und in viel kleineren Volumina konzentriert wurden.

Berechnungen, die anhand gemessener Werte der Durchlässigkeit von Gesteinen für den Gasfluß durchgeführt wurden, scheinen zu zeigen, dass sich jedes Gasfeld tatsächlich in einem kleinen Bruchteil des Alters erschöpfen würde, das ihm aufgrund des Alters seiner Einschlussgesteine zugeschrieben wird. Jon S. Nelson und E. C. Simmons und andere haben zum Beispiel berechnet, dass das Volumen und die Durchflussrate von Gasaustritten aus einem Gasfeld unter Gesteinen mit der niedrigsten erfassten Durchlässigkeit das Feld in nur wenigen zehntausend Jahren erschöpfen würde.[1] Ein direkter Beobachtungsnachweis der Austrittsraten muss jedoch erst erbracht werden, bevor diese scheinbar anomalen Ergebnisse als ernsthafte Herausforderung der biogenen Theorie verstanden werden.

Es gibt eine sehr kostengünstige Möglichkeit, die Rate der Ausgasung an vielen Orten zu messen. Stellen Sie auf einer kleinen Fläche ein Zelt auf, das mit einer durchlässigen Substanz wie Sand gefüllt ist und aus einem undurchlässigen Material wie Plastikfolie besteht. Sorgen Sie dafür, dass der äußere Rand rundherum so tief in den Boden eingegraben wird, dass der Wind nicht hindurchblasen kann. Dann verkabeln Sie das Innere dieses Zeltes mit Instrumenten, die kontinuierlich die Zusammensetzung der Luft und anderer Gase messen.
Methan und Kohlendioxid wären mit ziemlicher Sicherheit die wichtigsten Gase, die in das Zelt einströmen und gemessen werden könnten, aber es wäre auch hilfreich, die Stickstoff-, Argon- und Heliumströme aufzuzeichnen. Mit einer statistisch brauchbaren Anzahl von Zelten, die in einem Gebiet aufgestellt werden, wäre es möglich, das ungefähre Volumen des Ausflusses von Gasen von unten zu ermitteln.

Der Vorteil dieser Art der Datenerfassung ist, dass die Kosten für die Ausrüstung gering wären. Andere, teurere Techniken würden jedoch Ergebnisse von größerer Tragweite liefern. Eine solche Technik würde die Injektion eines Prüfgases in den Boden in einer bestimmten Tiefe beinhalten. (Ein geeignetes Prüfgas wäre eines, das im Boden nicht natürlich vorkommt und das im Verhältnis zum Gesteinsmaterial chemisch inert ist.) Nach der Injektion würde man die Zeit beobachten, die vergeht, bis dieses Gas an der Oberfläche um die Injektionsstelle herum nachgewiesen wird. Da dieses Prüfgas als kleine Beimischung zu den Gasen, die normalerweise durch den Boden strömen, mitgeführt werden muss, würde die vorgeschlagene Messung (zusammen mit der Kenntnis der Porosität im Bereich bis zur Injektionstiefe) die Strömungsgeschwindigkeit und Menge der Gase ergeben natürlich aufsteigen.

Um dieses Prüfgasexperiment durchzuführen, könnte man ein Bohrloch mit kleinem Durchmesser bis zu einer Tiefe von etwa einem Kilometer bohren und kurz vor der Sohle eine Verrohrung einzementieren, die das unterste Segment abdichtet. Über ein kleines Rohr, das in das geschlossene Segment der Verrohrung eindringt, würde das Prüfgas in einzelnen Stößen injiziert. Der einzige Ausweg für das Prüfgas wäre der Austritt nach unten in die natürliche Porosität des Gesteins. An der Oberfläche um die Bohrung herum würden dann Messgeräte für das Prüfgas eingesetzt, und aus der Zeit zwischen der Injek-

tion und dem ersten Auftreten des Tracers an der Oberfläche könnte so die Aufwärtsströmungsgeschwindigkeit der natürlichen Ströme berechnet werden.

Dieses Prüfgasverfahren würde gute Daten für die Projektion von Fließgeschwindigkeiten über ein relativ großes Gebiet liefern, wenn der Boden homogen ist. Die Verwendung mehrerer Bohrungen würde es ermöglichen, größere Inhomogenitäten zu erkennen. Das Verfahren würde auch ein weiteres Ergebnis liefern, das möglicherweise für die chemische Oberflächenprospektion von großem Interesse ist: Es würde zeigen, ob die Gase einen vertikalen Weg durch das Gestein nehmen oder ob sie aufgrund von seitlichen Druckunterschieden Wege nehmen, die in einem gewissen Winkel zur Vertikalen geneigt sind. Wir würden einfach feststellen, ob der Großteil des Prüfgases an einem Punkt austritt, der von der Injektionsstelle versetzt ist, anstatt das Bohrloch gleichmäßig zu umrunden.

Diese Prüfgastechnik zur Messung des Volumens und der Geschwindigkeit des Kohlenwasserstoffflusses aus der Tiefe in die Atmosphäre könnte zusammen mit der gröberen Zeltmethode in einer beliebigen Anzahl von Gasfeldern angewendet werden, in denen die Kohlenwasserstoffreserven gut definiert sind. Ich glaube, dass die Ergebnisse die Gas-Tiefen- Theorie weiter unterstützen und die biogene Theorie weiter in Zweifel ziehen würden.

Mikrobielle Untersuchungen

Wenn man die primordiale Natur der Kohlenwasserstoffe I und ihr Aufsteigen aus großer Tiefe für plausibel hält, ist es ein weiterer Schritt, die mögliche Existenz eines riesigen und eigenständigen Reiches des Lebens unter unserer eigenen Oberflächenbiosphäre ernst zu nehmen. Aber einheimische Mikroben sind tatsächlich in Kohlenwasserstoff-Flüssigkeiten aufgestiegen, die in großer Tiefe bei Ölbohrungen angetroffen wurden, wie in Kapitel 2 und 6 beschrieben. Und alle flüssigen Kohlenwasserstoffe tragen die Signatur organischer Moleküle, deren Art und Vorkommen sich am besten durch die postulierte Existenz eines planetenweiten Horizonts unterirdischer Mikroben erklären lässt, die sich von dieser reichen Quelle chemischer Energie ernähren (Kapitel 5). Wie können wir beginnen, etwas über die Bewohner der tiefen heißen Biosphäre zu erfahren?

Es ist schwierig genug, Mikroben zu studieren, die sich an der Oberfläche wohlfühlen, und die Nahrungsnetzbeziehungen zwischen den Lebewesen und ihren Stoffwechselprodukten zu ermitteln. Es ist sehr schwierig, diese Dinge für mikrobielle Ökosysteme zu tun, die Menschen niemals direkt besuchen können und deren Bewohner an Temperaturen und Drücke gewöhnt sind, die sich stark von den Umgebungsbedingungen in unseren Oberflächenlabors unterscheiden (und deren Nachbildung extrem teuer wäre). Wie können wir also sicher sein, welche Stoffwechselaktivität primär ist, d.h. welche die Grundlage des Nahrungsnetzes darstellt? Wie können wir feststellen, was die ursprüngliche Energiequelle ist, die das ganze System antreibt?

Es ist einfach, die Basis des Nahrungsnetzes und die ursprüngliche Energiequelle für jedes Ökosystem der Oberflächenbiosphäre zu bestimmen. Das liegt daran, dass alle solchen Nahrungsnetze letztlich von der Photosynthese abhängen. Finden Sie die Photosynthesizer (oder die vergrabenen Überreste der Photosynthesizer), und Sie finden die Basis des Nahrungsnetzes. Aber die Basis eines chemisch basierten Ökosystems zu finden, kann

extrem schwierig sein. Wie kann man feststellen, ob ein bestimmter chemischer Bestandteil eine ursprüngliche Ressource oder ein biologisches Produkt ist?

Aus unserem Verständnis des Lebens in der Oberflächenbiosphäre wissen wir, dass sich Kolonien von Mikroorganismen überall dort entwickeln werden, wo die energetischen, stofflichen, wässrigen, thermischen und chemischen Anforderungen des Lebens erfüllt werden können. Photosynthesizer an der Basis des oberirdischen Nahrungsnetzes wandeln die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie um, aus der sie ihren Stoffwechsel betreiben und ihren Körper aufbauen. Auf der Verbrauchsskala aufsteigend, wird die Energie, die in den Körpern oder Stoffwechselprodukten einer Gruppe übrig bleibt, von der nächsten Gruppe in der Reihenfolge verwertet.

Auch an den Schloten der Tiefsee kann man erwarten, dass eine Reihe verschiedener chemischer Prozesse in ein und demselben Wasserkörper ablaufen. Das liegt daran, dass die Abfälle eines jeden wahrscheinlich die Nahrung eines anderen sind. Der schwierige Teil ist zu entscheiden, welches der primäre Schritt ist, der die Energie für all diese biologischen Aktivitäten liefert, und woher die wesentlichen Nährstoffchemikalien kommen. Reduzierte Moleküle, die oxidiert werden können, liefern die Energie. Die gleichen Moleküle, ergänzt durch andere Sorten, werden Kohlenstoff, Wasserstoff, Wasser, Sauerstoff, Stickstoff und (in kleineren Mengen) verschiedene andere Chemikalien liefern, die benötigt werden, um komplexe biochemische Reaktionen in Gang zu setzen. Um empirisch zu bestimmen, welche Substanz die primäre Energiequelle und welche das Oxidationsmittel für ein chemisch basiertes System ist, sind mehr Informationen erforderlich, als durch das Studium des Stoffwechsels einer einzelnen Art von Bewohnern gewonnen werden können.

Um mikrobielles Leben in der Tiefe der äußeren Erdkruste oder an einem Grenzgebiet, wie z.B. an Schloten in der Tiefsee, zu untersuchen, ist es üblich, eine Probe biologisch aktiver Flüssigkeit (Impfstoff) zu entnehmen und Anschließend wird versucht, diese Probe in einem sterilisierten Gefäß zu kultivieren, in dem die materiellen Bedingungen herrschen, die für das Wachstum der einheimischen Mikroben als notwendig erachtet werden. Wenn z. B. Schwefelwasserstoff in der kultivierten Probe vorhanden ist und auch molekularer Sauerstoff zugeführt wird, kann davon ausgegangen werden, dass jegliches Wachstum Schwefelwasserstoff als Brennstoffquelle und molekularen Sauerstoff als Oxidationsmittel verwendet hat. Wenn Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle bereitgestellt wird, deutet das Bakterienwachstum unter diesen Bedingungen auf das Vorhandensein von kohlenstofffixierenden Mikroben hin.

Es ist wichtig, sich daran zu erinnern, dass Sie bei der Kultivierung von Mikroben keine Methanotrophen entdecken werden, wenn Sie keine Wachstumskammer mit Methan als Brennstoff zur Verfügung stellen. Wenn Sie nicht versuchen, ein bisschen Inokulant mit einer Kohlenstoffquelle wie Methan zu ernähren, anstatt mit Kohlendioxid, dann werden Sie natürlich keinen Organismus entdecken, der Methan und nicht Kohlendioxid verwertet. Da Stoffwechseluntersuchungen an Mikroben aus Tiefsee-Schloten biologische Aktivität auf einem Laborkulturmedium aus Schwefelwasserstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid nachgewiesen haben, wird allgemein angenommen, dass die Organismen, die diese Materialien nutzen, die Basis des Nahrungsnetzes darstellen. Aber einer der Hauptbeteiligten an dieser Forschung, David Karl, fordert seine Kollegen auf, "einen offenen Geist zu bewahren".[2] Die bloße Tatsache, dass ein lebendes System nachgewiesen wurde, bedeutet nicht, dass dies das primäre ist und dass es keine anderen gibt.

Dementsprechend hoffe ich, dass der Quelle und der Rolle von Methan in diesem Ökosystem mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird. Wie in Kapitel 2 erwähnt, wurden Mikroben, die ihre Energie und ihren Kohlenstoff aus Methan beziehen (Methanotrophe), in Symbiosen mit Muscheln an den Tiefsee-Schloten entdeckt.[3] Ich gehe davon aus, dass weitere Forschungen schließlich zeigen werden, dass Methan eine wichtige chemische Grundlage des Ökosystems der Tiefsee-Schlote ist. Es ist auch möglich, dass sich Schwefelwasserstoff als ein Abfallprodukt von Methanotrophen erweist, die Sauerstoff aus Sulfat gewinnen. Sauerstoff aus Sulfat gewinnen, und in diesem Fall wird Methan die grundlegende Position zuerkannt werden.

Das Einbringen der richtigen Brennstoffquelle, des Oxidationsmittels und der Nährstoffe in das Labor-Kulturgefäß ist nur der erste Schritt. Ebenso wichtig ist es, den beimpfenden Mikroben ein für sie geeignetes Temperatur- und Druckbad zu bieten. Wenn eine Probe aus einer Ölquelle bei 110°C und 600 Atmosphären Druck entnommen wird, dann sollten diese Bedingungen auch den Mikroben in ihrem neuen Zuhause zur Verfügung stehen. Es ist in der Mikrobenforschung allgemein bekannt, dass Hyperthermophile nicht bei Temperaturen wachsen können, die der Mensch als angenehm empfindet, und hohe Temperaturen sind im Labor nicht schwer zu erreichen. Aber es ist eine ganz andere Sache, Mikroben 600 Atmosphären Druck zu bieten. Nur wenige, wenn überhaupt, mikrobiologische Labore sind so ausgestattet. Ein Mangel an ausreichender Druckbeaufschlagung bei Kultivierungsexperimenten kann besonders nachteilig für Impfstoffe sein, die Methanotrophe enthalten, die aus großen Tiefen heraufgezogen wurden. Methanotrophe können die diffusen Dämpfe von Methan bei atmosphärischem Druck möglicherweise nicht erreichen. Für sie kann Tiefe (oder simulierte Tiefe) nicht nur wünschenswert, sondern essentiell sein.

Solange wir unsere Laboratorien nicht mit Kultivierungsgefäßen ausstatten, die die für große Tiefen charakteristischen Bedingungen von intensiver Hitze und Druck imitieren, sollten wir das Fehlen mikrobieller Aktivität in Kultivierungsexperimenten nicht als Beweis für das Fehlen von Leben in solchen Tiefen interpretieren. Außerdem sollten wir, wenn biologische Moleküle in einer Probe identifiziert werden, aber nicht zu metabolischer Aktivität überredet werden können, diese Moleküle nicht automatisch als Kontamination abtun, die von der Oberfläche während des Bohrens eingeführt wurde. Stattdessen kann es sein, dass wir die Mikroben auf dem Weg ins Labor versehentlich abgetötet haben.

Selbst wenn ideale Laborbedingungen vorhanden sind, kann die erfolgreiche Kultivierung von Mikroben aus der Tiefe durch die Methoden, die für den Transport der biologischen Proben zum Labor verwendet werden, untergraben werden. Hohe Temperaturen und hohe Druck können nicht nur für das Wachstum, sondern auch für das Überleben erforderlich sein. Wenn sie auch nur für kurze Zeit atmosphärischem Druck ausgesetzt werden, kann das tödlich sein, genauso wie man von einigen Fischen, die aus der Tiefe eingeholt werden, nicht erwarten kann, dass sie leben und in ihre Heimat zurückkehren, wenn der Haken an Bord entfernt wird. John Postgate erzählt in seinem Buch "*The Outer Reaches of Life*" die Geschichte von Forschern, die versuchten, eine Probe von einer Stelle in der Antarktis zu kultivieren.[4] Die ersten Kultivierungsversuche ergaben Mikroben, die bei sehr kalten Temperaturen funktionieren und sich vermehren konnten. Aber diese Mikroben waren nicht unbedingt auf kalte Temperaturen angewiesen; sie konnten sich auch bei wärmeren Temperaturen vermehren. Erst als die Proben während des gesamten Weges

vom Feld zum Labor unter kalten Bedingungen gehalten wurden, entdeckte man neue Mikroben, die nur bei kalten Temperaturen überleben konnten.

Diese Geschichte ist ein abschreckendes Beispiel für Forscher, die versuchen, Proben aus Tiefbrunnen zu kultivieren. Wenn Proben aus Tiefbohrungen nicht während des gesamten Weges durch die Röhre und auf dem Weg zum Labor mit geeigneten Bedingungen versorgt werden, können wir nicht erwarten, dass die Lebensformen in einem Zustand ankommen, der es uns erlaubt, sie aus ihrer Ruhe zu wecken. Wie schwierig kann es sein, geeignete Bedingungen zu schaffen? Wenn eine Probe in einer Tiefe von 5 Kilometern entnommen würde, würde der Druck dort zwischen 500 und 1500 Atmosphären betragen. Man bräuchte in der Tat sehr starke Gefäße und außergewöhnlich gute Dichtungen, um Proben mit einer für solche Tiefen repräsentativen biologischen Integrität zu erhalten. Im Gegenzug müssen alle Kultivierungsexperimente bei Drücken und Temperaturen durchgeführt werden, die denen am Ursprungsort der Proben ähnlich sind. Wenn der Druck dort unten annähernd 1500 Atmosphären und die Temperatur 120°C betragen würde, wäre der Bau und der Betrieb der Kultivierungsgeräte sehr kostspielig. Mir sind keine Berichte über solche Geräte bekannt geworden.

Es gibt aber noch eine andere und vielleicht viel einfachere Möglichkeit, vorzugehen. Wir könnten einen Behälter mit ausreichender mechanischer Festigkeit in das Bohrloch schicken der so stabil ist, dass er dem Druck der Flüssigkeit standhält. Der Behälter sollte zwei Kammern haben, die auf Befehl von der Oberfläche geöffnet und geschlossen werden können. Eine Kammer könnte mit einem üblichen Bakterienkulturmedium, wie Acetat oder Zucker, ausgestattet werden. Die andere würde mit dem Material versehen werden, von dem man annimmt, dass es der Sauerstoffspender für mikrobielles Leben dort unten ist. In der gewählten Tiefe würden wir beide Kammern öffnen und mit dem Bohrwasser füllen lassen und dann wieder schließen. Die Innenräume würden so auf dem Druck und der Temperatur gehalten, bei denen die Probe entnommen wurde. Der Behälter könnte für die Zeit, in der sich die Kulturen entwickeln, in dieser Tiefe belassen werden. Wenn die Experimentierkammern wieder in das Niedrigdruck- und Niedrigtemperaturregime der Oberflächenbiosphäre hochgezogen werden, könnte ein Großteil des mikrobiellen Materials abgetötet werden. Aber die Endprodukte ihres Stoffwechsels könnten immer noch entdeckt werden. Wenn also eine Kammer mit dem Oxidationsmittel Eisen(III) in Form von kleinen Partikeln versorgt worden war, aber bei der Rückkehr an die Oberfläche festgestellt wurde, dass sie das Eisen in einem weniger oxidierten Zustand enthielt, wie z. B. Magnetit, würden wir daraus schließen, dass das in der Tiefe eingebrachte Impfmittel einen Erreger transportiert hatte, dessen Stoffwechsel die Reduktion von Eisen(III) erforderte, möglicherweise unter Verwendung der reduzierten Gase oder Flüssigkeiten, die sich im Bohrloch angesammelt hatten.

Durch diese und andere innovative Kultivierungstechniken könnte eines Tages die gesamte Ökologie des Lebens in der Tiefe aufgedeckt werden. Schritt für Schritt werden die verschiedenen Mikroben der Tiefe beprobt, kultiviert und verstanden werden. Einige Interpreten der Ergebnisse werden zweifellos immer noch zu dem Schluss kommen, dass unsere eigene Biosphäre an der Oberfläche Strategien zum Überleben in einer extremen Umgebung beherrscht, indem sie sich an den geologisch aufbereiteten Überresten des Lebens an der Oberfläche laben, die längst tot und lange in den Sedimenten begraben sind. Andere mögen mit mir zu dem Schluss kommen, dass wir auf eine völlig neue Welt gestoßen sind.

Leben auf der Oberfläche anderer Planeten?

Wie in Kapitel 1 erwähnt, hängt die Existenz von Leben, wie wir es kennen, vollständig von der Anwesenheit von flüssigem Wasser ab. Eis oder Dampf reichen nicht aus. Wasser in seiner festen Form verliert jegliche Fähigkeit, als Matrix für das Mischen und Zusammenpassen von Molekülen zu dienen. Wenn sich nichts bewegen kann, können auch keine Rekombinationen von Atomen stattfinden. Wenn die Temperatur mehr als ein paar Grad über dem lokalen Siedepunkt von Wasser liegt, entweicht Wasser als Dampf aus jedem biologischen Material. Wasserdampf, der in eine Atmosphäre anderer Gase gemischt ist, kann jedoch biologischen Systemen Wasser liefern und sogar durch chemische Einwirkung in flüssiges Wasser umgewandelt werden. Dies kann aber nur im Temperaturbereich zwischen Gefrieren und Sieden geschehen.

Wenn Wasser - und zwar Wasser in flüssiger Form - tatsächlich eine Voraussetzung für Leben auf der Oberfläche eines Planeten ist, dann muss eine Kombination von mehreren Bedingungen vorliegen, die für das Vorhandensein von Wasser notwendig sind, insbesondere die Beschaffenheit des Zentralsterns, die Entfernung der Planetenbahn von diesem Stern, die Größe und Masse des Planeten und die Beschaffenheit der Atmosphäre des Planeten. Wenn die Photosynthese als Hauptenergiequelle benötigt wird, dann ist auch ein erheblicher Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche des Sterns und der des Planeten erforderlich. Licht geeigneter Wellenlänge und das Vorhandensein von flüssigem Wasser diktieren also zusammen, was sich als ein sehr enges Fenster für Leben auf der Oberfläche erweist.

Wasser ist ein häufiges Molekül im Universum, aber Wasser in seiner flüssigen Phase ist auf Planeten- und Satellitenoberflächen dieses Sonnensystems selten. Es gibt nur einen Körper, der so gesegnet ist: unsere eigene blaue Perle von einem Planeten. Wir brauchen nicht weiter zu schauen als zu unseren beiden nächsten planetarischen Nachbarn, der Venus und dem Mars, um zu erkennen, wie viel Glück es für das Leben auf der Oberfläche war, dass sich die Erde an der richtigen Stelle auftauchte, die richtige Größe und Zusammensetzung hatte und die richtige Art von Stern hatte, um sie zu beleuchten.

Lassen Sie uns mit der Venus beginnen. Die Venus erhält fast doppelt so viel Sonneneinstrahlung wie die Erde. Klimamodellberechnungen[5] zeigen, dass, wenn die Erde ein solches Maß an Sonneneinstrahlung ertragen müsste, ein "Führerloses-Treibhaus" entstehen würde, das alle Aussichten auf Leben auf der Oberfläche zerstören würde. Da sich die Sonne langsam erwärmt, ist ein " führerloses Gewächshaus" auch in der Zukunft der Erde zu erwarten - allerdings erst in Milliarden von Jahren[6]. Ein durchgehendes Treibhaus funktioniert folgendermaßen: Erstens bedeutet eine höhere Strahlungsintensität zunächst ein heißeres Klima, wodurch mehr flüssiges Wasser auf der Oberfläche eines Planeten verdampft. Das wärmere Klima erlaubt auch, dass mehr von diesem Wasserdampf in der Atmosphäre verweilt, bevor er als Regen ausfällt. Wasserdampf ist ein Treibhausgas - tatsächlich ist es das effektivste Treibhausgas in der Erdatmosphäre. Er ist für den größten Teil der einfallenden Solarenergie durchlässig, aber wenn ein Teil des sichtbaren Lichts an der Erdoberfläche in den Infrarotbereich umgewandelt wird, wird die Abstrahlung eines Teils dieser Wärme zurück ins All blockiert. Wassermoleküle, die in der Atmosphäre als Dampf vorhanden sind, reflektieren diese längeren Wellenlängen zurück zur Erdoberfläche, was den Planeten weiter aufheizt und es der Atmosphäre ermöglicht, noch mehr Wasser in einem dampfförmigen Zustand zu halten - was sich wiederum auf die von der

Erde zurückgehaltene Wärmemenge auswirkt, und so weiter. Schließlich würde das gesamte Oberflächenwasser verdampfen.

Schlimmer noch: Ein intensives Treibhausklima würde einen Großteil des Wasserdampfs in die oberen Bereiche der Atmosphäre drücken, wo seine molekularen Bindungen durch die energiereichsten Wellenlängen der Sonnenstrahlung gefährdet wären. Wenn Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten werden, entweicht der leichtgewichtige Wasserstoffanteil (H_2) aus der oberen Atmosphäre direkt ins Weltall. Die verbleibenden Sauerstoffatome können sich dann entweder dem Vorrat an atmosphärischem Sauerstoff anschließen oder den Oxidationsgrad der Oberflächenmaterialien des Planeten erhöhen. Jeder Kohlenstoff wird wahrscheinlich zu Kohlendioxid oxidiert, das dazu bestimmt ist, in der Atmosphäre eines wasserlosen Planeten zu bleiben. CO_2 ist ein starkes Treibhausgas, und es wird durch ein Gravitationsfeld, das so stark ist wie das der Erde oder der Venus, stabil eingeschlossen werden. Solange der Planet weiterhin kohlenstoffhaltige Gase aus seinem Inneren verdrängt, wird sich CO_2 in der Atmosphäre anreichern.

Das ausufernde Treibhaus auf der Venus ist bis zum wasserlosen Ende fortgeschritten. Obwohl die Venus aus den gleichen Trümmern des Sonnensystems wie die Erde entstanden ist und wahrscheinlich auch mit einem gewissen Wassergehalt begonnen hat, kann in ihrer Atmosphäre heute kein Wasserdampf mehr nachgewiesen werden. Die venusische Atmosphäre wird von CO_2 dominiert.

Auf unserer eigenen wasserreichen Welt sind die Kohlenstoffatome etwa in dem Maße aus der Atmosphäre entfernt worden, wie sie durch Ausgasungen aus den Tiefen der Erde zugeführt wurden. Methan und Kohlendioxid sind die Hauptquellen des Kohlenstoffs, der in die heutige Atmosphäre gelangt, wie in früheren Kapiteln erwähnt, und auch Methan verwandelt sich in unserer oxidierenden Atmosphäre schnell in Kohlendioxid und Wasser. Die Statistiken von Bohrlöchern und die Untersuchung von meteoritischem Material (die Überreste der Konstruktion der Planeten) deuten beide stark darauf hin, dass Methan das Hauptgas ist. Kohlendioxid wird der Atmosphäre wieder entzogen, dauerhaft oder langfristig, vor allem durch die Bindung in Karbonatgesteinen, die sich am Meeresboden ablagern. Interessanterweise würde, wenn dieser wasservermittelte Weg des Kohlendioxidentzugs auf der Erde nicht funktionieren würde, unsere eigene Atmosphäre heute etwa so viel Kohlendioxid enthalten wie die unseres Schwesterplaneten Venus, wo der atmosphärische Oberflächendruck etwa das Achtzigfache der unseren beträgt. Es gäbe keine Ozeane, keinen Regen und keine Oberflächenbiosphäre.

Wenn wir uns dem Mars zuwenden, stoßen wir auf das entgegengesetzte Problem für wasserabhängiges Oberflächenleben. Während die Intensität der Sonnenstrahlung auf der Venus doppelt so hoch ist wie auf der Erde, beträgt die Intensität auf dem Mars weniger als die Hälfte der unseren. Es überrascht nicht, dass die Oberfläche des Mars überall unterhalb der Gefriertemperatur von Wasser liegt, und in einigen Gebieten und Jahreszeiten sogar sehr weit darunter. Es scheint, dass, während die Venus zu nahe an der Sonne ist, der Mars zu weit entfernt ist. Aber der Mars hat einen noch größeren Nachteil als seine Abgelegenheit. Der Mars ist zu klein.

Die Oberflächentemperatur hängt sowohl von der Entfernung zur Sonne als auch von den Treibhauskapazitäten und der Dichte der Atmosphäre ab. Je kleiner die Masse des Planeten ist, desto weniger massiv ist der Ausgasungsprozess, der eine Atmosphäre erzeugt, und desto schwächer ist die Gravitationskraft, die zur Kompression der Atmosphäre wirkt.

Eine solche Atmosphäre ist auch besonders anfällig für Sonnenausbrüche der Intensität, wie sie einige Male in jedem elfjährigen Sonnenzyklus auftreten. Diese Ausbrüche können einen Teil der Atmosphäre eines Planeten oder Mondes mit geringer Schwerkraft wegfegen, insbesondere wenn der Körper kein Magnetfeld hat, das ihn vor den hochenergetischen ionisierten Teilchen der Sonne abschirmt. Da der Mars nur ein Zehntel der Masse der Erde (ein Drittel unserer Schwerkraft) und kein allgemeines Magnetfeld hat, würde er leicht solche Verluste erleiden.

Die heutige Marsatmosphäre hat nur ein Siebentausendstel des Atmosphärendrucks der unsrigen. Sie besteht fast vollständig aus dem Treibhausgas Kohlendioxid, aber es ist viel zu wenig CO_2 vorhanden, um die Oberflächentemperaturen so weit anzuheben, dass Eis schmilzt und Regen fällt. In der Tat sind die Pole so kalt, dass die Eiskappen zum Teil aus Kohlendioxid-Eis bestehen.

Die geringe Masse der Marsatmosphäre schränkt die Möglichkeiten für flüssiges Wasser auf eine noch wichtigere Weise ein. Jeder, der schon einmal versucht hat, in großen Höhen zu kochen, wird dieses Problem kennen. In großen Höhen drückt weniger Atmosphäre auf die Oberfläche eines Topfes mit Wasser. Flüssiges Wasser verdampft daher leichter, und der Siedepunkt sinkt. Das bedeutet, dass der atmosphärische Druck auf einem Planeten den Temperaturbereich definiert, in dem flüssiges Wasser an der Oberfläche existieren kann.

Auf Meereshöhe auf der Erde drückt die Atmosphäre mit einem Gewicht von etwa 1 Kilogramm pro Quadratzentimeter Oberfläche nach unten. Dieser Druck bietet ein 1000°C-Fenster für flüssiges Wasser, zwischen Sieden und Gefrieren, was ein 100°C-Fenster für jegliche Formen von Leben an der Oberfläche bedeutet, um Stoffwechselaktivitäten durchzuführen. (Dieser Bereich kann durch im Wasser gelöste Chemikalien um einige Grad vergrößert werden). Ein Temperaturbereich von 1000°C für flüssiges Wasser ist nicht viel mehr, als das Leben benötigt, um mit der Bandbreite der Sonnenwärme zurechtzukommen, die auf verschiedene Teile unseres eigenen Planeten trifft. Auf dem Mars ist dieses Fenster für flüssiges Wasser viel enger, denn obwohl der Siedepunkt von Wasser entscheidend vom Atmosphärendruck abhängt, beeinflusst dieser Druck kaum seinen Gefrierpunkt. Der Atmosphärendruck, den die derzeitige geringe Masse der Marsatmosphäre ausübt, würde es nicht zulassen, dass dort flüssiges Wasser existiert; stattdessen würde es gefrieren und sublimieren (direkt vom festen in den dampfförmigen Zustand übergehen, ohne vorher den flüssigen Zustand zu durchlaufen). Um einen so großen atmosphärischen Druck wie hier auf der Erde und damit einen ähnlichen Temperaturbereich für flüssiges Wasser zu haben, müsste sich im schwachen Gravitationsfeld des Mars über jedem Quadratzentimeter der Oberfläche die dreifache Menge an atmosphärischer Masse befinden. Es müsste also mehr als 140-mal so viel Masse vorhanden sein wie in der heutigen Marsatmosphäre.

Aber kann man davon ausgehen, dass eine solche Atmosphäre jemals auf dem Mars existiert hat? Woher sollte das alles kommen und wie sollte es verschwinden? CO_2 ist ein schweres Molekül (44 atomare Masseneinheiten) und würde fest auf dem Mars gehalten werden, während das leichte Wasserdampfmolekül (nur 18 Masseneinheiten) entweichen oder durch hochenergetische Komponenten des Sonnenlichts dissoziiert werden könnte, so dass der Wasserstoff dann in den Weltraum entweicht und der Sauerstoff auf dem Planeten verbleibt, entweder in der Atmosphäre oder gebunden in Oberflächenmaterialien. Der gleiche Prozess findet auf der Erde statt, aber hier, mit größerem Gravitationsdruck

und unter dem Schutz eines Magnetfeldes entweicht jedoch nur wenig Wasserdampf direkt in den Weltraum. Ein Teil des dissoziierten Wasserstoffs entweicht jedoch, wie bereits erwähnt, und der dissoziierte Sauerstoff verbindet sich mit dem großen Pool des atmosphärischen Sauerstoffs.

Gab es jemals flüssiges Wasser auf dem Mars? Könnte die Marsoberfläche einst Leben beherbergt haben? Es wird allgemein angenommen, dass in der fernen Vergangenheit tatsächlich Flüsse auf dem Mars geflossen sind. Die Bilder der Viking-Raumsonde aus dem Jahr 1976 schienen den Beweis für eine ehemals gut bewässerte Welt zu liefern. In dieser Denkweise sind trockene Kanäle von einst riesigen Flüssen markante Merkmale der Marslandschaft. Einige Kanäle sind so groß, dass man annimmt, dass sie durch plötzliche Brüche natürlicher Dämme entstanden sind, die weitaus größere Wassermengen freisetzten, als jemals über die Erde geflossen sind.

Ich (und andere vor mir[7]) glaubten, dass die Fließmuster an der Oberfläche des Mars viel befriedigender durch Vergletscherung erklärt werden können. In meinen Augen haben die sehr breiten und sanft geschwungenen Täler, die als "Superhighways" bezeichnet werden, Formen, die ganz charakteristisch für den Gletscherfluss sind und überhaupt nicht wie der Fluss einer Flüssigkeit. Wo zum Beispiel ein größeres Hindernis in einem Kanal liegt, spaltet sich das Strömungsmuster um dieses herum auf und vereinigt sich dahinter wieder, so dass eine tränenförmige Insel entsteht. Alle Richtungsänderungen dieser Kanäle sind sanft; die Kurven umfassen nicht mehr als 30 Grad Richtungsänderung in 100 Kilometern. Die Ränder der Kanäle sind glatt und weisen keine scharfen Einschnitte auf, und die Ufer behalten über Hunderte von Kilometern die gleiche Neigung bei. Solche Merkmale können nicht durch Wasser erklärt werden, egal wie schnell es fließen soll. Schnell fließendes Wasser ist turbulent; die Fließrichtung wird nur für kurze Strecken beibehalten, bevor Turbulenzen und selbst kleine Unregelmäßigkeiten des Geländes den Fluss erheblich umlenken. Im Gegensatz dazu ist Eis ein Feststoff, genauer gesagt eine Flüssigkeit mit enorm hoher Viskosität. Es ist diese Viskosität, die die Strömung glatt, langsam und frei von Turbulenzen macht. Die Steifigkeit des Materials widersetzt sich jeglichen Strömungsmustern, die abrupte Richtungsänderungen erzwingen würden.

Obwohl die "Superhighway"-Kanäle am besten als Aufzeichnung von Bewegungen früherer riesiger Vergletscherungen auf der Marsoberfläche erklärt werden können, gibt es andere Kanäle, die alle Kurven und Unebenheiten irdischer Flüsse aufweisen und durch abrupte Richtungsänderungen gekennzeichnet sind. Einige zeigen sogar die Art von Schleifen, die wir in den großen Flussdeltas der Erde sehen. Solche Merkmale deuten sicherlich darauf hin, dass dort einst flüssiges Wasser geflossen ist, aber jetzt sind es trockene Rillen in der Marsoberfläche. Würde das bedeuten, dass eine große Atmosphäre einst flüssiges Wasser auf der Oberfläche schützte und dass die Temperatur der Atmosphäre über dem Gefrierpunkt lag?

Das glaube ich nicht. Auch hier würde die Existenz einer dicken Vergletscherung in früheren Zeiten diese Merkmale erklären. Unter terrestrischen Gletschern fließt nämlich Wasser, und dieses Wasser gräbt die Fließmuster von Flüssen im Boden darunter aus. Auf der Erde sehen wir in vielen Fällen, in denen sich ein Gletscher zurückgezogen hat, fluviale Merkmale. Es ist zu erwarten, dass der gleiche Prozess auf dem Mars stattgefunden hat. Wäre der Eisschild 2 Kilometer dick gewesen, hätte er im Schwerefeld des Mars einen Druck ausgeübt, der 67 Erdatmosphären entspricht. Eine dicke Eisdecke hätte auch für eine Wärmeisolierung gesorgt, so dass Wasser, das aus tieferen Schichten erwärmt

wurde (durch dieselben Prozesse der Schwerkraftsortierung, Kompression und des radioaktiven Zerfalls, die das Erdinnere aufheizen), unter das Eis eindringen und fließen konnte. Solche subglazialen Flüsse hätten Kanäle gegraben und Material transportiert, genau wie sie es auf unserem eigenen Planeten getan haben.

Im Laufe der Zeit wären die Marsgletscher zu Wasserdampf sublimiert. Wegen des schwachen Atmosphärendrucks hätte das Gletschereis kein flüssiges Stadium durchlaufen müssen. Sublimation, nicht Schmelzen, hätte also die Eiszeit auf dem Mars beendet. Die von den Gletschern gegrabenen Kanäle und die Ablagerungen der subglazialen Flüsse aus flüssigem Wasser wären relativ unversehrt freigelegt worden. Eine Vielzahl von Gesteinen unterschiedlicher Größe und Art, die durch große Einschläge auf die verschiedenen Ebenen der Gletscher während ihrer langsamen Verdunstung verstreut wurden, würden sich schließlich alle sanft auf der trockenen Oberfläche absetzen, was den Ursprung der zahlreichen Felder erklärt, die dicht mit einer Vielfalt von Gesteinen besiedelt sind.

Eines der allerersten Viking-Fotos von 1976 zeigt einen auf der Oberfläche ruhenden Felsen, der viel größer ist als alle anderen in dem dichten Feld. Um ihn herum sind viel kleinere Felsen versammelt, die eindeutig gute Annäherungen an kreisförmige Muster definieren. Genau diese Art von Merkmalen wurde schon oft (von mir und von vielen anderen) auf terrestrischen Gletschern beobachtet. Wie kommt dieses Muster zustande? Das große Gestein erwärmt sich im Laufe des Tages und speichert viel Wärme, die schließlich nach außen abgestrahlt wird. Das umgebende Eis, das von vornherein weniger Wärme aufgenommen hat, wird durch den Felsen ein wenig erwärmt und verdunstet daher etwas schneller als das andere Eis. Um das Gestein herum wird sich ein Trichter im Eis bilden. Was auch immer an Steinen im Eis eingeschlossen ist, wird auf den Boden des Trichters purzeln, wenn er sich bildet. Wenn die Temperatur und die Verdunstungsraten im Laufe der Zeit variieren (wie es auf der Erde sicherlich der Fall war), werden sich Ringe aus Geröll um den großen Felsen bilden.



Abbildung 10.1
Eine kleine glaziale Erscheinung auf dem Mars. Ringe aus Gesteinsbrocken, die den großen Felsen in der Mitte umgeben, sind ein deutlicher Hinweis auf die Vergletscherung und die anschließende Verdampfung des Eises. Viele ähnliche Merkmale wurden auf terrestrischen Gletschern beobachtet. Mit freundlicher Genehmigung der NASA.

Die 1997 von der NASA-Mission Pathfinder und dem ferngesteuerten Fahrzeug, das die Oberfläche des Planeten durchstreifte, aufgenommenen Bilder des Mars bestätigten die Ergebnisse der Viking-Missionen zwei Jahrzehnte zuvor. Dicht verstreute Gesteine ganz unterschiedlicher Zusammensetzung sind ein gemeinsames Merkmal, und in den Zwischenräumen zwischen den Gesteinen findet sich ein pulverförmiges Gesteinsmaterial. Meiner Meinung nach ist die Dichte der Gesteine in diesen Feldern so hoch, dass es schwierig wäre, sie als Objekte zu erklären, die mit hoher Geschwindigkeit aus Einschlagskratern herausgeschleudert wurden. In diesen Gesteinen ist nur sehr wenig Zerstörung zu sehen. Im Gegensatz dazu würde ein Streufeld aus Einschlägen Bruch erzeugen, da viele der Flugbahnen in einem kleinen Winkel zur Oberfläche verlaufen und somit viele andere Felsen zerschlagen würden, bevor sie zur Ruhe kommen. Eine glaziale Erklärung erklärt die auf dem Mars entdeckten Mikro- und Makromerkmale besser.

Ein weiteres großräumiges Merkmal auf dem Mars, das die Vereisung erklären würde, ist der markante Steilhang, der die Basis des größten Berges, Olympus Mons, umgibt, der möglicherweise der größte Vulkan[8] im Sonnensystem ist. Dieser sehr steile Steilhang ist zwischen 1 und 2 Kilometer hoch, rund um den Berg. Es ist sehr schwer zu erklären, wie die Lava genau an dieser Kante aufhörte, den Berg hinunterzufließen, oder wie eine so große Menge an gefrorener Lava anschließend weggetragen werden konnte. Aber wenn der Vulkan zur Zeit der letzten großen Eruptionen von Gletschern umgeben gewesen wäre

und das Eis eine Dicke von 2 Kilometern gehabt hätte, dann wäre alles, was an Flüssigkeiten den Berg hinunterkam, auf oder nahe der Gletscherebene aufgehalten worden. Nachfolgende Sublimation hätte den steilen Steilhang hinterlassen. Ähnliche Merkmale sind von terrestrischen Vulkanen berichtet worden, die an Gletscher grenzen.

Diese und viele andere Merkmale auf dem Mars deuten eher auf eine starke Vergletscherung hin, als auf riesige, an der Oberfläche fließende Flüsse. Die Interpretation solcher Merkmale als vergletschert löst auch ein großes Problem, auf das Planetenforscher stoßen, wenn sie versuchen, Modelle der Klimageschichte des Mars zu konstruieren. Es ist sehr schwierig, plausible Szenarien vorzuschlagen, nach denen der Mars einst eine Atmosphäre behalten haben könnte, die massiv genug war, um flüssiges Wasser festzuhalten, das dann verschwinden müsste, wobei weniger als ein Hundertstel seiner ursprünglichen Masse zurückbleiben würde - und das alles, während er eine "fluviale" Landschaft durch Überschwemmungen geformt hat, die weitaus größer sind als jene, die über die Oberfläche der Erde geflossen sind.

Wenn die Venus zu heiß ist, um wasserbasiertes Leben auf ihrer Oberfläche zu unterstützen, dann ist der Mars zu kalt. Die felsigen Monde der großen äußeren Planeten sind sogar noch kälter als der Mars, aber im Gegensatz zum Mars sind diese Monde so kalt, dass gefrorenes Wasser auf ihren Oberflächen für lange geologische Zeiträume überlebt. Oberflächenleben auf anderen planetaren Körpern in unserem Sonnensystem scheint also ausgeschlossen zu sein.

Erweiterte Suche nach extraterrestrischem Leben

Das aufregendste Forschungsgebiet der Zukunft, in dem wir viel über den Ursprung und die Entwicklung des Lebens lernen werden, ist die Untersuchung von Leben unter der Oberfläche anderer planetarer Körper. Unterirdisches Leben ist jedoch eine andere Sache. Der Mars, die Trabanten der großen Planeten, viele Asteroiden und sogar unser eigener Mond sollten als reale Aussichten für die Beherbergung von außerirdischem Leben dieser Art angesehen werden. in unserem Sonnensystem. Es wäre eine große Hilfe, bei diesen notwendigerweise teuren und langwierigen Erkundungsmissionen bereits ein klares Verständnis des ersten solchen Beispiels gewonnen zu haben: der tiefen heißen Biosphäre der Erde. Eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Weltraumprogramm und der tiefengeochemischen Erforschung unseres eigenen Planeten könnte für beide Seiten von Vorteil sein und Entdeckungen ermöglichen, die für beide Bemühungen wichtig sind.

Obwohl die Oberflächenbedingungen auf den anderen festen planetaren Körpern alle ganz anders sind als auf der Erde, werden die Bedingungen unter der Oberfläche in vielen der größeren planetaren Körper den unseren ähnlich sein. Das Verhältnis von Druck und Temperatur mit der Tiefe wird natürlich anders sein, aber die Chancen, dass sich in einer gewissen Tiefe Leben entwickelt hat, dürften sich nicht allzu sehr von denen hier unterscheiden. Kohlenwasserstoffe (Methan und andere) wurden spektroskopisch auf den Oberflächen und in den Atmosphären vieler dieser Körper nachgewiesen, und in den meisten von ihnen ist unterirdisch flüssiges Wasser zu erwarten (Wasser scheint in der zirkumsolaren Wolke, aus der die Planeten entstanden sind, reichlich vorhanden gewesen zu sein, und Eis wurde auf mehreren anderen planetaren Körpern und Kometen nachgewiesen, die kälter als die Erde sind). Die Gesteine, wie die der Erde, sollten einige oxidierte Komponenten enthalten, die als Sauerstoffspender dienen. Damit wären die Voraussetzungen für die Existenz von Mikrobiologie dort gegeben.

Der Mars wäre der am wenigsten kostspielige planetarische Körper, um ihn auf Hinweise auf unterirdisches außerirdisches Leben zu untersuchen, da wir möglicherweise keine Raumsonde starten müssen, um mit einer solchen Untersuchung zu beginnen. Meteoriten, die gelegentlich auf die Erde fallen, tragen die chemische Signatur des Mars. Mehrere Meteoriten, die in den Eisfeldern der Antarktis gesammelt wurden, scheinen vom Mars zu stammen. Spurenelementverhältnisse wie die Abfolge der Edelgase von Neon bis Xenon sowie das eher ungewöhnliche Stickstoff-Isotopenverhältnis der Marsatmosphäre wurden von den früheren Viking-Landefahrzeug gemessen, und sehr ähnliche Werte für diese Größen tauchen in diesen Meteoriten auf. Es scheint sehr unwahrscheinlich, dass Trümmer von irgendeinem anderen Körper so genau mit diesen Werten übereinstimmen. Millionen von Jahren nach einem Einschlag auf dem Mars, der den Auswurf von Marsmaterial verursachte, führten die Umlaufbahnen einiger dieser Auswürfe zu Kollisionen mit der Erde.

Im Jahr 1996 lieferte ein solcher Meteorit (mit der Bezeichnung ALH84001) starke Hinweise darauf, dass das Gestein durch mikrobielles Leben verändert wurde, während es noch Teil des Mars war.[9] Eine detaillierte Untersuchung ließ es sehr unwahrscheinlich erscheinen, dass dieser Nachweis auf eine Kontamination durch Leben auf der Erde zurückzuführen war. Vielmehr war der biologische Abdruck bereits im Inneren des Steins vorhanden, bevor er vom Mars ausgeworfen wurde. Wie viele Meteoriten wurde auch ALH84001 auf den Oberflächenflächen des Gletschereises in der Antarktis gefunden, frei von jeglichem irdischen Schutt.

Der Meteorit ALH84001 verleiht unserer Suche nach außerirdischem Leben Nachdruck, denn das Gestein stammt mit ziemlicher Sicherheit nicht von der Marsoberfläche, sondern aus einer gewissen Tiefe. Damit ein Objekt vom Mars in eine Umlaufbahn geschossen werden kann, die schließlich auf der Erde endet, müsste ein sehr großer Einschlag auf dem Mars dafür verantwortlich gewesen sein. Es gibt viele große Einschlagskrater auf dem Mars, so dass dies nicht unwahrscheinlich erscheint. Bei einem großen Einschlag wird der größte Teil des herausgehobenen und möglicherweise mit hoher Geschwindigkeit geschleuderten Materials aus einer beträchtlichen Tiefe gekommen sein. Wenn das der Fall ist, ist der Nachweis biologischer Prozesse im Meteoriten ein Beweis für Leben in der Tiefe - nicht für Leben an der Oberfläche, das später in neuen Marssedimenten begraben wurde.

In einem kleinen Meteoriten auf einem langen Flug durch den Weltraum sollten die flüssigen oder gasförmigen Produkte der Tiefenmikrobiologie in der Regel in kurzer Zeit entweichen. Es sind die vom Leben geschaffenen Feststoffe, die den Anhaltspunkt geben. Nach welchen Feststoffen sollten wir suchen? Wenn sich kohlenstoffbasiertes Leben auf dem Mars von primordialen Kohlenwasserstoffen ernährt (oder einst ernährte), die aus größerer Tiefe aufsteigen, und wenn Marsleben Sauerstoff benötigte, um auf die Energie zuzugreifen, die durch die chemische Reaktion von Sauerstoff mit den Kohlenwasserstoffmolekülen zur Verfügung steht, dann wäre ein Indiz der veränderte Zustand des Sauerstoffspenders. Wenn Eisenoxide als Sauerstoffspender dienten, dann wäre das Endprodukt Eisen in einem weniger oxidierten Zustand, der zufällig magnetisch ist. Magnetit ist die häufigste Form, und wie in Kapitel 6 erwähnt, war die Fülle an äußerst kleinen Magnetitpartikeln, die wir in unserem Bohrloch in Schweden in der Tiefe entdeckten, ein wichtiger Beweis für Leben am Werk. Wenn Schwefeloxide die Sauerstoffspender sind, würden wir alternativ dazu erwarten, dass Sulfide als dauerhafte Überreste auftreten. Das

Produkt der Oxidation der Kohlenwasserstoffe wäre Kohlendioxid und Wasser, und in vielen Gesteinen würden diese mit Oxiden von Kalzium oder Magnesium reagieren, um feste Karbonate zu bilden. In unserer eigenen tiefen Biosphäre nehmen die Karbonat-Nebenprodukte des Lebens die Form von Zementen an, die kleine Porenräume ausfüllen.

Wir wissen, dass hoch oxidiertes Eisen auf dem Mars reichlich vorhanden ist, und sehr kleinkörniges Magnetit wurde tatsächlich in dem Marsmeteoriten nachgewiesen, der auf Anzeichen von biologischer Veränderung untersucht wurde. Dieser Meteorit enthält auch Eisensulfid und Karbonatzemente. Außerdem enthält er polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, bei denen es sich um die großen Moleküle handeln könnte, die von einem ursprünglichen Erdöl übrig geblieben sind, das einst im Gestein enthalten war und dessen leichtere Moleküle nach vielen Jahrtausenden im Vakuum des Weltraums verschwunden sind. Darüber hinaus enthält der Meteorit kleine Objekte, die unter dem Rasterelektronenmikroskop nachweisbar sind und bei denen es sich um Fossilien von Mikroben handeln könnte. Obwohl die vermeintlichen Fossilien für sich genommen kein schlüssiger Beweis wären, spricht die Assoziation von Magnetit, Eisensulfid, Karbonaten und schweren Kohlenwasserstoffen meiner Meinung nach stark für eine mikrobielle Erklärung. Es stimmt zwar, dass jedes Element auch ohne biologischen Eingriff produziert werden kann, aber die Wahrscheinlichkeit, sie zufällig in einem kleinen Volumen zusammen zu finden, wäre sehr gering. Viele terrestrische Öl- und Gasbohrungen zeigen genau eine solche Assoziation (aber auch eine Assoziation mit Helium, das der Meteorit nicht durch den Weltraum transportiert haben kann).

Die Argumente für unterirdisches Leben auf dem Mars sind inzwischen so verlockend, dass ein Besuch auf dem Mars in dieser Frage wissenschaftlich sehr produktiv sein könnte. Für zukünftige interplanetare Missionen, die eine Probe zur Erde zurückbringen könnten, wäre es am besten, Orte aufzusuchen, an denen jetzt Material freigelegt ist, das sich einst in einer gewissen Tiefe befunden haben muss.[10] Der Boden der tiefen "Valles Marineris" ist ein solcher Ort. Dort haben massive Erdrutsche Material freigelegt, das sich einst in einer Tiefe befunden haben muss, die weit in den Bereich des flüssigen Wassers hineinreicht. Große Einschläge werden sich ebenfalls tief in den Wasserbereich gegraben haben, so dass Proben, die bei solchen Ereignissen hochgeschleudert wurden, ebenfalls wasserbezogene Effekte aufweisen können.

In meinem Aufsatz von 1992, in dem ich die Idee der tiefen heißen Biosphäre vorstellte, schlug ich vor, dass vielleicht 10 planetarische Körper in unserem Sonnensystem geeignete unterirdische Heimstätten für grundsätzlich die gleiche Art von Leben bieten würden, wie wir sie auf der Erde haben.[11] Ich machte diese Vorhersage, indem ich eine ziemlich einfache und generische Formel verwendete: Jeder felsige Planetenkörper, der mindestens so groß ist wie der Erdmond, sollte die erforderlichen Bedingungen unter der Oberfläche bieten, nämlich Wärme und aufsteigende Kohlenwasserstoffe.

Zwei Überlegungen führten mich dazu, unseren Mond als untere Größengrenze für eine unterirdische Biosphäre zu wählen. Erstens werden Körper, die kleiner als unser Mond sind, wahrscheinlich auch in der Tiefe kein flüssiges Wasser tragen. Zweitens wiesen empirische Beweise auf das Vorhandensein von lunaren Kohlenwasserstoffen hin. Die einzig denkbare Ursache für die tiefen, internen Beben, die auf dem tektonisch gefrorenen Mond beobachtet wurden, ist das Öffnen und Schließen von Poren durch aufsteigende Fluide. Dort, wie auch auf der Erde, sollten diese Fluide primordiale Kohlenwasserstoffe enthalten. Ein Instrument, das von einer Apollo-Mission auf dem Mond platziert wurde,

entdeckte Gaspartikel der Masse 16 (in atomaren Masseneinheiten) zu den Zeiten solcher Beben. Ich kenne kein Atom oder Molekül mit dieser Masse, das stabil und unreaktiv genug wäre, um sich seinen Weg durch das Mondgestein zu bahnen, abgesehen von Methan.

So kam ich 1992 zu dem Schluss, dass unterirdisches Leben in einer Reihe von Planetenkörpern tatsächlich möglich ist. Aber ich konnte damals nicht beurteilen, ob extraterrestrisches Leben nicht nur möglich, sondern wahrscheinlich ist - vielleicht sogar häufig. Seitdem bin ich davon überzeugt, dass Leben in diesen Körpern sehr wahrscheinlich ist. Ich habe jetzt nicht mehr substantielle empirische Beweise als damals. Das Argument basiert vielmehr auf Logik. Zunächst einmal gehe ich davon aus, dass die tiefe Biosphäre innerhalb der Erde nicht nur unabhängig vom Leben an der Oberfläche ist, sondern dass sie auch der Vorläufer des Lebens an der Oberfläche war. Wenn ich richtig liege mit der Annahme, dass 10 Planetenkörper unterirdische Bedingungen bieten, die für Leben geeignet sind, und dass allein unser eigener Planet für Oberflächenleben geeignet ist, dann wäre es höchst unwahrscheinlich, dass sich eine tiefe Biosphäre zufällig nur auf dem einen Planeten entwickelt hat, der auch Oberflächenleben tragen könnte.

Begann das Leben unabhängig oder durch eingeschleppte Keime (Panspermie)?

Wenn es anderswo in diesem Sonnensystem Leben unter der Oberfläche gibt, würde es dann unabhängig auf jedem Planetenkörper entstanden sein? Oder könnte es natürliche Mechanismen geben, durch die Leben von einem Planeten oder Mond zu einem anderen transportiert wird? Diese letztere Art der interplanetaren biologischen Infektion wird als *Panspermie* bezeichnet.

Um diese Fragen zu beantworten, müssten wir überlegen, ob sich mikrobielles Leben spontan an allen günstigen Orten entwickeln könnte. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass Leben unabhängigen Ursprungs eine ähnliche Grundchemie angenommen hätte? Und wenn interplanetare Infektion ein Mechanismus wäre, wie würde er funktionieren?

Wenn wir auf einem anderen planetarischen Körper eine Art von Biologie finden würden, die ganz andere Grundschritte der Chemie verwendet, außerhalb des Bereichs der Varianten, die wir für das irdische Leben beobachtet haben, würden wir schließen (wenn auch nicht mit völliger Sicherheit), dass sie einen unabhängigen Ursprung darstellt. Diese Entdeckung würde wiederum nahelegen, dass einige Varianten des Lebens mit hoher Wahrscheinlichkeit an vielen anderen günstigen Orten entstehen sollten. Aber wenn wir Lebensformen mit einer ähnlichen Grundchemie sehen würden, könnten wir dann eine Unterscheidung zwischen Panspermie und einer sehr eng parallelen Evolution treffen? Vielleicht ist unsere eigene Biochemie die einzige, die funktionale Organismen hervorbringen könnte, in diesem Fall würde man keine anderen finden. Oder vielleicht ist unsere eine von wenigen möglichen Biochemie und würde aus diesem Grund wahrscheinlich woanders entdeckt werden.

Was wäre, wenn sich herausstellen würde, dass die Biochemie einer außerirdischen Ökologie fast die gleiche ist wie die der Erde - nur mit der entgegengesetzten Chiralität? Wie in Kapitel 9 beschrieben, ist ein Molekül chiral, wenn es ein anderes Molekül geben kann das mit dem Spiegelbild des ersten Moleküls identisch ist, sich aber in keiner anderen

Weise unterscheidet. Die DNS zum Beispiel ist ein schraubenförmiges Molekül, das sich spiralförmig nach rechts dreht. Sein chirales Gegenteil wäre das gleiche Molekül, das sich spiralförmig nach links dreht.

Wenn wir in biologischen Molekülen eines anderen planetarischen Körpers die gleiche Grundchemie wie bei uns finden würden, die Chiralität aber entgegengesetzt wäre, hätten wir einen stichhaltigen Beweis für die Schlussfolgerung, dass Leben mit der gleichen Grundchemie mit hoher Wahrscheinlichkeit *unabhängig* auf anderen Körpern mit ähnlichen Untergrundbedingungen entstehen könnte. Wenn wir dort jedoch die gleiche Chiralität vorfänden, könnten wir nur sagen, dass sie möglicherweise aus einer gemeinsamen Evolution mit der unseren stammen (Panspermie), oder dass ein unabhängiger Ursprung, der die gleiche Grundchemie bevorzugt, mit einer 50:50-Chance auf die gleiche Chiralität wie die unsere gestoßen sein könnte.

Wenn wir solche Beobachtungen für einen weiteren planetarischen Körper wiederholen und dabei ein zweites außerirdisches Beispiel mit der gleichen, erdähnlichen Chiralität erhalten, würden wir zu dem Schluss kommen, dass die Beweise beginnen, auf einen gemeinsamen Ursprung hinzuweisen, weil ein unabhängiger Ursprung eine Wahrscheinlichkeit von nur 1 zu 4 gehabt hätte, in drei unabhängigen Fällen die gleiche Chiralität zu liefern. Die Untersuchung weiterer planetarer Körper würde dann zur Klärung der Frage unerlässlich werden.

Durch welchen Mechanismus könnte sich Leben, das innerhalb eines Planetenkörpers entstanden ist, auf einen anderen ausbreiten? Der in der Antarktis gefundene Marsmeteorit liefert die Antwort: ein massiver Einschlag, der Stücke eines Planeten oder Mondes abspaltet und ins All schleudert. Zusätzlich zum Trauma des Austritts aus dem Heimatplaneten und des Eintritts in einen neuen Planeten wäre das Leben tragende Gestein auf dem Weg dorthin der kosmischen Strahlung ausgesetzt. Wäre die Reise lang, wären die Wechselfälle einer längeren Ruhephase eine weitere Herausforderung für die erfolgreiche Infektion eines neuen planetaren Körpers. Schädliche Strahlung und der Lauf der Zeit würden den natürlichen Transport von Leben zwischen Sternsystemen besonders stark einschränken. Transport von Leben zwischen Sternensystemen - die galaktische Panspermie. Die Chancen würden sich verbessern, wenn es im Raum zwischen den Sternen Körper von planetarer Größe gäbe, die unterirdische Biosphären tragen könnten. Die größten hochentwickelten Teleskope würden große Schwierigkeiten haben, solche Körper zu entdecken.

Molekülwolken könnten solche dunklen Objekte ständig bilden, und nur ein Bruchteil würde mit einem Stern in Verbindung kommen. Sie könnten ein aktives inneres mikrobielles Leben enthalten und über Milliarden von Jahren aufrechterhalten, so wie es auf der Erde der Fall zu sein scheint. Dementsprechend könnten sie aktives Leben in der Tiefe über interstellare Distanzen durch den Raum tragen. Wenn ein solches Objekt vielleicht in die Nähe eines Planetensystems käme, würden Kollisionen mit Planeten dann die Verteilung von aktivem, lebendem Material ermöglichen. Einschläge mit kleineren Objekten, die wie der Marsmeteorit Stücke abspalten, könnten das gleiche Ergebnis erzielen. In diesem Fall gäbe es weder eine Abhängigkeit von ruhendem Leben über lange Zeiträume, noch von einer langfristigen Resistenz gegen Schäden durch kosmische Strahlung, zwei Probleme, die andere Vorschläge zur Panspermie im galaktischen Maßstab unwahrscheinlich erscheinen lassen. Auch wenn die Chancen gegen die hier beschriebene galaktische

Panspermie sehr hoch sind, ist sie nicht unmöglich. Panspermie zwischen Planeten eines Planetensystems wäre eindeutig eine Möglichkeit, wie der Marsmeteorit gezeigt hat.

Ist das alles nur müßige Spekulation? Sollten wir die in diesen Kapiteln dargestellten Ansichten nicht zur Kenntnis nehmen? Sollten ich und andere die Erforschung der tiefen, heißen Biosphäre und die Suche nach mikrobiellem Leben unter der Erdoberfläche aufgeben? Sollte die wissenschaftliche Gemeinschaft auch den Mut aufgeben, systematisch nach dem Ursprung des Erdöls zu forschen, nach dem Grund für die starke Assoziation von Helium mit Erdöl, nach der Ursache von Erdbeben, und warum verschiedene Metallminerale so häufig zusammen an einem Ort vorkommen? Dies sind alles Merkmale, die von den herrschenden Theorien noch nicht erklärt werden konnten, so dass ihnen besondere Aufmerksamkeit gebührt (anstatt der Vernachlässigung, die unerklärliche Phänomene in der modernen wissenschaftlichen Literatur eher vernachlässigt werden). Die Geschichte der Wissenschaft bietet ein Beispiel nach dem anderen für scheinbar unerklärliche Merkmale, für die schließlich vollkommen rationale Erklärungen gefunden wurden. In fast allen solchen Fällen verdeckten Annahmen, die allgemein geglaubt wurden, die Wahrheit so effektiv, dass kein Fortschritt in Richtung einer Lösung möglich schien. Doch gerade bei solchen scheinbar unerklärlichen Merkmalen müssen wir hoffen, Anhaltspunkte zu finden, die uns zeigen, wie wir uns von falschen Überzeugungen befreien können.

Spekulationen sind ein wichtiger Schritt in diesem Prozess. Es wurde einmal spekuliert, dass sich die Erde um die Sonne dreht. Ohne diese Spekulationen hätte meiner Meinung nach kein systematischer Weg der Forschung die Beweise erbracht, die diese Theorie bestätigten. In einer Zeit, in der die Lösungsvorschläge noch spekulativ sind, sind sie die treibende Kraft für die Forschungen, die sie als richtig oder falsch erweisen werden und damit unser Denken auf eine neue und bessere Spur bringen werden.

Nachwort zur Taschenbuchausgabe

Seit der Erstveröffentlichung dieses Buches im Dezember 1998 bin ich nur noch mehr davon überzeugt, dass es sich bei Erdöl und Steinkohle nicht um fossile Rückstände handelt, die sich von der Erdoberfläche in ihre unterirdischen Ruheplätze vorgearbeitet haben. Diese weithin akzeptierte Sichtweise ihres *biogenen* Ursprungs ist meiner Meinung nach falsch, und dieses Buch schlägt eine Alternative vor - nämlich dass die massiven Kohlenwasserstoffreserven der Erde *abiogen* sind, dass sie Teil der "Ursuppe" waren, aus der unser Planet entstanden ist, und dass sie bis heute in Hülle und Fülle tief im Inneren unseres Planeten vorhanden sind und weiterhin zur Oberfläche aufsteigen.

Meine Gründe für diese zugegebenermaßen kontroverse Ansicht sind zahlreich. Erstens ist es für mich ziemlich offensichtlich geworden, dass die *Menge* an Steinkohle und Erdöl (und insbesondere deren Erdgas-Komponente, Methan) weitaus größer ist, als durch irgendeine Theorie erklärt werden könnte, die von vergrabenen biologischen Trümmern abhängt. Zweitens wurden und werden Erdöl und Methan an *Orten* auf der Erde gefunden, zu denen oberirdische biologische Überreste nie Zugang hatten; das Vorhandensein von Erdöl und Gas an diesen Orten kann einfach nicht durch die biogene Theorie erklärt werden. Drittens findet man an diesen Stellen keine der anderen Rückstände, die man bei der Anwesenheit von biogenen Kohlenwasserstoffen erwarten würde. Und viertens, und das ist vielleicht am bezeichnendsten, ist man sich mittlerweile einig, dass es auf vielen

anderen Körpern in unserem Sonnensystem einen reichhaltigen Vorrat an Kohlenwasserstoffen gibt, bei denen kein biologischer Ursprung an der Oberfläche vermutet werden kann. Dennoch ist die Verwendung des Namens "fossile Brennstoffe" für den Vorrat an Kohlenwasserstoffen auf der Erde weit verbreitet und erweckt den Eindruck, dass ihr Ursprung in der Oberflächenbiologie zweifelsfrei feststeht. Jede Entdeckung, die dieser alten Interpretation widerspricht, wird immer noch oft als "höchst überraschend" oder "unerklärlich" bezeichnet, auch wenn die Beweise an und für sich nicht in Frage gestellt werden. Dieser fehlende Zusammenhang zwischen unbestrittenen Beweisen und der allgemein akzeptierten Theorie ist besonders seltsam, wenn man den weit verbreiteten Glauben bedenkt, dass es einen grundsätzlichen Mangel an diesen sogenannten "fossilen Brennstoffen" gibt. Seit vielen Jahrzehnten, als wir mehr und mehr Reserven an Erdöl und anderen Kohlenwasserstoffen gefunden haben, mussten wir unsere Schätzungen ständig nach oben korrigieren. Für mich ist die alternative Schlussfolgerung unausweichlich: Die Vorräte an Erdgas, Erdöl und Kohle gehen uns nicht aus, und nach intensiver Nutzung über ein Jahrhundert hinweg wissen wir heute von mehr Reserven, als in der Vergangenheit je vorhergesagt wurden.

Jeder irdische Kohlenwasserstoff enthält Moleküle, deren biologischer Ursprung außer Zweifel steht, aber das beweist nicht, dass der *Ursprung* des Kohlenwasserstoffs biologisch ist. Die alternative Lösung, die in diesem Buch dargelegt wird, lautet, dass das gesamte Erdöl, das wir aus dem Boden gewinnen, in größerem Umfang biologisch verunreinigt ist, und zwar in tieferen Schichten, als unsere Bohrer erreichen können. Lebendiges Material, tief unter der Oberfläche unseres Planeten, hat seine Spuren in dem Öl, Gas und der Steinkohle hinterlassen, die schließlich an die Oberfläche kommen.

"Aber die Mengen an biologischen Verunreinigungen sind sehr groß", könnte ein halbwegs skeptisches Gegenargument lauten: "Wo wäre denn Platz für all das lebende Material, das in Ihrer Interpretation benötigt wird? Und woher würde es sich ernähren, woher den Kohlenstoff und die vielen anderen Elemente beziehen, die für die Erhaltung des Lebens notwendig sind? Und ist es denkbar, dass wir nicht auf die Existenz eines einer so großen unterirdischen Domäne des Lebens?"

Wenn die Beweise für den tiefen Ursprung des Erdöls stark sind, wie es zu sein scheint, dann muss eine massive unterirdische Biologie existieren. Diese Möglichkeit wurde in der Vergangenheit nicht in Betracht gezogen, obwohl Chemiker, die die Zusammensetzung des Erdöls studiert hatten, dies stark angedeutet hatten: "Eine Ursubstanz, der Bioprodukte zugefügt wurden", so beschrieb Sir Robert Robinson, der Nobelpreisträger für Chemie von 1947, das Erdöl. Heute gibt es jedoch eindeutige Beweise für die Existenz einer massiven Tiefenbiosphäre. Sie stellt nicht nur eine kleine Störung im Schema der Geochemie dar, wenn es darum geht, all die biologischen Substanzen zu erklären, die Kohlenwasserstoffe hochbringen und über lange Zeiträume der Erdgeschichte hochgebracht haben. Stattdessen ist sie riesig. Platz für all dieses lebende Material ist kein Problem, vorausgesetzt, es handelt sich um mikrobielles Leben, das in den Poren von Gesteinen gedeiht. In der Erdkruste, wo eine Porosität von einigen Prozent üblich ist, und die sich über eine vertikale Dimension von vielleicht 10 Kilometern erstreckt, könnte dieser massive separate Bereich des Lebens weit mehr als das Volumen betragen, das von allem Leben an der Oberfläche eingenommen wird.

Wie sieht es mit der Ernährung aus? Nach oben sickernde Kohlenwasserstoffe liefern den Kohlenstoff und können die Energie für das Leben liefern, wenn Sauerstoff für ihre Ver-

brennung verfügbar ist. Der große Vorrat an Sauerstoff in der Oberflächenatmosphäre reicht natürlich nicht bis in tiefe Schichten. Und der Sauerstoff, der in unterirdischen Gesteinen gefunden wird, ist zu fest gebunden, um für die Unterstützung von Leben nützlich zu sein, da es mehr Energie erfordern würde, ihn freizusetzen, als durch seine Verwendung für die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen gewonnen werden kann. Es gibt jedoch ein paar häufige unterirdische Substanzen, die Sauerstoff ausreichend billig liefern können. Die wichtigsten davon sind oxidierter Schwefel in Form von Sulfaten und hochoxidiertes Eisen, deren Rückstände Sulfide bzw. niedrig oxidierte Eisenarten wie Magnetit sind. Und in der Tat finden sich gerade in erdölreichen Gebieten massive Mengen an Sulfiden und Magnetit. Ähnlich, gibt es eine große Anzahl von Rissen auf dem Meeresboden, aus denen Kohlenwasserstoffgase austreten, und diese Gase bieten Nahrung für das üppige mikrobielle Leben in der Umgebung der Schlote. Diese Stellen sind auch von großen Ablagerungen von Metallsulfiden umgeben, denn in diesem Fall scheint der Sauerstoffspender das Sulfat-Ion zu sein, ein prominenter Bestandteil des Meerwassers.

Andere Beweise für einen konstanten Nachschub an Öl und Gas aus der Tiefe stammen aus Beobachtungen in der Erdölindustrie. Wir haben gesehen, dass sich Öl- und Gasfelder selbst wieder auffüllen, manchmal genauso schnell, wie sie abgepumpt wurden, und viele Felder haben bereits ein Vielfaches dessen produziert, was frühere Schätzungen vorausgesagt hatten. Erdölwissenschaftler haben auch festgestellt, dass Öl oft Spurenelemente enthält, die sich von dem unterscheiden, was man von dem Gestein, das einem bestimmten Feld zugrunde liegt, erwarten könnte. Nickel und Vanadium sind seit langem in dieser Kategorie bekannt, aber wir müssen der Liste das Edelgas Helium hinzufügen, dessen Konzentration keine andere Erklärung als einen tiefen Ursprung hat, sowie eine Reihe von Metallen, von denen man annimmt, dass sie aus viel tieferen Schichten stammen - einschließlich Iridium, Gold, Silber und Platin.

Wenn man die Erdölindustrie betrachtet, muss man auch die weit verbreiteten und unerwarteten Orte berücksichtigen, an denen jetzt gebohrt wird. In Russland wurde ein großes Projekt durchgeführt, um festzustellen, inwieweit das Grundgestein und nicht die Sedimente Kohlenwasserstoffe enthalten. In Tatarstan (in Zentralrussland) wurden mehr als 300 tiefe Bohrungen durchgeführt, alle in aufgebrochenes Grundgestein, in Tiefen von 5 Kilometern oder mehr. In den meisten wurden hohe Mengen an Kohlenwasserstoffen nachgewiesen. In anderen Teilen der Welt gibt es etwa hundert Bohrungen, die ebenfalls im Grundgebirge niedergebracht wurden, und viele davon fördern Erdöl. Unter diesen ist die jüngste Entdeckung eines großen Offshore-Standorts in Vietnam, das White-Tiger-Feld, von besonderem Interesse, da dort eine sehr gute Ölproduktion, größtenteils aus Grundgebirgsgestein, im Gange ist.

Dann gibt es noch die Beweise aus dem Meer. Methanhydrat, eine Eisbildung aus einer Wasser-Methan-Kombination, bedeckt sehr große Bereiche des Meeresbodens, und die Gesamtmenge des Elements Kohlenstoff, die in dieser Substanz enthalten ist, ist schätzungsweise größer als der Kohlenstoff, der in aller Kohle und allem Öl enthalten ist, das auf der Welt identifiziert wurde. Diese Konzentration an Kohlenstoff kann nicht durch das Absinken von oberirdischem Pflanzenmaterial entstanden sein, da ein solcher Vorrat viel zu klein ist und viel anderes Material mit nach unten gebracht hätte, das dort nicht vorhanden ist. Aber darüber hinaus, wie konnten sich meterdicke Schichten aus diesem festen Eis aus einer Zufuhr von oben bilden, wenn weder Pflanzenmaterial noch b a r e Methangas durch das Eis nach unten dringen konnte? Dennoch werden große Gasblasen nachgewiesen, die zwischen dem Gestein des Meeresbodens und der darüber liegenden

Eisschicht festgehalten werden. Dieses Gas kann nicht an solche Stellen gelangt sein, außer durch Risse im darunter liegenden Gestein. Auf eine weit verbreitete Methanausgasung deutet auch der Permafrost an Land hin, der ähnlich verschlossene Methanhydrate sowie Methangasblasen aufweist. Dies würde bedeuten, dass die Methanausgasung der Erde ein weit verbreiteter oder allgemeiner Prozess ist, ganz im Einklang mit den Informationen, die wir von den Meeresschloten und ihren schnell wachsenden Kolonien von Leben haben.

Hinzu kommen plötzliche Ausbrüche von Gas aus dem Meeresboden. In einigen Fällen wurden diese heftigen Phänomene direkt beobachtet, wie bei der Eruption, die im Juli 1998 an der Küste von Papua, Neuguinea, einen verheerenden Tsunami verursachte. Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass bestimmte Merkmale des Meeresbodens nur als Ergebnis der explosiven Gasausbrüche interpretiert werden können. Einige haben kreisförmige Vertiefungen mit einem Durchmesser von bis zu 200 Metern gebildet und wurden in vielen Gebieten gefunden, einschließlich der Ostküste der Vereinigten Staaten, aber auch speziell in Gebieten, von denen bekannt ist, dass sie kommerzielle Mengen an Erdgas produzieren, wie die Nordsee und die Ostküste Neuseelands. Messungen des allmählichen Austretens von Gas zu ruhigen Zeiten haben gezeigt, dass Methan die Hauptkomponente dieser Ausbrüche ist.

In diesem Bild können wir dann verstehen, dass Erdöl aus tiefen Schichten der Erde kommt, aus weitaus größeren Reservoirs weit unterhalb unserer Reichweite, so wie es auch auf den zahlreichen anderen Körpern des Sonnensystems gewesen sein muss, die große Mengen an Erdöl aufweisen, aber kein Leben an der Oberfläche besitzen. Auf dem Weg nach oben, in Ebenen, die ein Ölsucher als tief bezeichnen würde, die aber immer noch viel flacher sind als der Ursprung des Erdöls, fällt die Temperatur auf Ebenen, in denen etwas mikrobielles Leben möglich ist, und wo dieses Leben in diesen Kohlenwasserstoffen reiche Nahrungsquellen findet und sich vermehrt. Dieses Nahrungsangebot stammt aus chemischen Quellen, die die Erde selbst bereitstellt; es hat nichts mit der Photosynthese an der Oberfläche zu tun. Wir haben es hier mit einer eigenständigen Domäne des Lebens zu tun, nicht mit einer Erweiterung des uns bekannten Oberflächenlebens. Die Mengen an mikrobiellem Material in dieser Biosphäre können auf zwei Arten geschätzt werden: zum einen aus den mikrobiellen Trümmern, die in den Kohlenwasserstoffablagerungen zurückbleiben, zum anderen aus den festen mineralischen Rückständen, die die mikrobiellen Aktionen hinterlassen haben. Wenn diese Schätzungen vorgenommen werden, kommen wir zu Mengen, die so groß sind, dass es jetzt fraglich ist, ob unsere Oberflächenbiosphäre nach Masse die Hauptdomäne des Lebens auf der Erde ist: Es könnte sein, dass diese Unterscheidung stattdessen der mikrobiellen Masse in den Poren des Erdgesteins gehört.

Die einzige Verbindung, die wir zwischen den beiden Biosphären sehen, ist die genetische. Die tiefe Biosphäre nutzt dieselben genetischen Prozesse und Moleküle wie die Biosphäre an der Oberfläche, so dass vermutlich die eine von der anderen abstammt. Aber was war zuerst da? Die Photosynthese, die die primäre Energiequelle für das Leben an der Oberfläche ist, ist ein sehr komplexer - man könnte sogar sagen "fragiler" - Prozess. Er kann nicht am Anfang des Lebens gestanden haben. Die aufwendige chemische Verarbeitung muss zuerst erfunden worden sein, und das frühere Leben, das diese Verarbeitung hervorgebracht hat, muss einfachere chemische Energiequellen zur Verfügung gehabt haben. Das allein würde die tiefe Biosphäre für den Beginn des Lebens favorisieren, aber es gibt noch einige andere Überlegungen, die in die gleiche Richtung weisen.

Die primitivsten Formen von Mikroben, und damit als die frühesten beurteilt, gehören zu einem besonderen Zweig. Der Physiker und Mikrobiologe Carl Woese hat gezeigt, dass sich dieser Zweig so sehr von den Bakterien unterscheidet, dass er eine eigene Klassifizierung erhalten sollte, und er hat dafür den Namen "Archea" vorgeschlagen. Inzwischen hat sich gezeigt, dass die Mehrzahl der Thermophilen (wärmeliebende Mikroben) zu dieser Klasse gehört, was die Vermutung nahelegt, dass der Ursprung des Lebens in einer warmen oder heißen Umgebung lag. Dies wiederum begünstigt die tiefe Biosphäre, die lange Zeiträume mit nahezu konstanten Umweltbedingungen bietet. In einer solchen Umgebung würde ein entstehendes Leben nicht durch schnelle Veränderungen, z. B. der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Strahlung oder der Winde, unterbrochen werden, wie es an der Oberfläche der Fall wäre.

Mikrobielles Leben oder sogar kleinere Formen wären der wahrscheinlichste Kandidat, um die ersten Schritte in Richtung selbstreplizierendes komplexes Leben zu machen, wenn auch nur aus Gründen der Wahrscheinlichkeit. Mikrobielles Leben zeigt bei weitem die schnellsten Anpassungen, die schnellste Entwicklung von neuen Merkmalen durch darwinistische Selektion, wegen seiner kurzen Reproduktionszyklen und der großen Anzahl von individuellen Organismen in jeder Generation. Aus demselben Grund würden wir die Anfänge fortgeschrittenen Lebens auch in der größten Domäne mikrobiellen Lebens suchen, die wir heute kennen - und auch hier erfüllt die tiefe Biosphäre die Voraussetzungen.

Viele Diskussionen über den Ursprung des Lebens haben sich auf das Bild eines warmen Pools konzentriert, der eine Auswahl von Elementen oder chemischen Verbindungen enthält, die für die Entstehung der Chemie des Lebens günstig sind. Aber da gäbe es ein Problem. Ein wesentlicher Aspekt des Lebens ist die Reproduktion, die Wiedererschaffung einer bestehenden Form. Ein solcher Prozess muss zwangsläufig zu einer exponentiellen Vermehrung der Anzahl mit der Zeit führen. Wenn der erste Organismus in einer Zeit T einen wie sich selbst reproduziert, dann werden es nach einer Zeit 2T 4, nach 10T 10^{24} und nach 100T 10^{30} sein:

1,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000

Wie groß der Teich auch gewesen sein mag und wie viel "Nahrung" er auch enthalten haben mag, er wäre bald erschöpft gewesen. Die unvermeidliche Folge ist ein kurzes Festmahl, gefolgt von einer endgültigen Hungersnot. Wie kann das existierende Leben dies vermeiden und für eine lange Zeit fortbestehen? Das geht nur, wenn es die stabilisierende Wirkung eines jederzeit begrenzten, aber ständig erneuerten Nahrungsangebots gibt. In unserem Oberflächenleben sind wir damit so vertraut, dass wir vergessen, wie essentiell es ist. Hier, an der Oberfläche, ist das Sonnenlicht die begrenzte und immer wieder erneuerte Energieversorgung; seine Energie wird jeden Tag ausgeschüttet, und er steigt jeden Morgen auf (nicht für immer, aber für eine sehr lange Zeit). Die tiefe, heiße Biosphäre entgeht der Fress- und Hungersituation, indem sie das Leben mit dem kontinuierlichen, langlebigen Versickern von Chemikalien aus Quellen unterstützt, die zu tief und damit zu heiß sind, um für die Lebensformen, die wir haben, verfügbar zu sein. Es gibt dort also eine "dosierte" Nahrungsversorgung, genau wie an der Oberfläche.

Alles Leben ist im Wesentlichen eine Erweiterung des Prozesses der Autokatalyse, der Replikation einer Entität wie eines Moleküls. Wenn wir die zufälligen chemischen Pro-

zesse zum Aufbau eines autokatalytischen Moleküls als ersten Schritt betrachten, dann wären die Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen in der Tiefe günstig. Dort finden mehr und schnellere chemische Wechselwirkungen statt als in kühleren, niedrigeren Drucksituationen, und daher ist die Wahrscheinlichkeit, ein außergewöhnliches Molekül aufzubauen, dort am größten. Außerdem wird die Anzahl der verschiedenen Arten von Molekülen, die stabil sind, durch den Druck stark erhöht. Die tiefe, heiße, unter hohem Druck stehende Biosphäre ist der beste Ort, um nach der Bildung einer so großen Anzahl verschiedener Moleküle zu suchen, dass die Chance, einen Autokatalysator zufällig zu bilden, vielleicht nur in langen geologischen Zeiten und in riesigen Mengen reaktiver Materialien, eine vernünftige Möglichkeit wird. Und ein einziges autokatalytisches Molekül wird in einer kleinen Anzahl von Reproduktionsperioden (etwa 100) über alle anderen dominieren, wie wir bereits oben gesehen haben.

Das Leben kann sich als ein äußerst unwahrscheinliches Ereignis der gewöhnlichen Chemie entwickelt haben, aber unter Umständen, wo die Anzahl der chemischen Prozesse so groß war, dass das Unwahrscheinliche wahrscheinlich wurde. Wir können dann an Biosphären in anderen planetarischen Körpern denken, in denen ähnliche Umstände herrschen wie die, die wir hier sehen. In einem solchen Bild würde die Anpassung an das Leben an der Oberfläche, und dann an große und komplexe Lebensformen, nur auf einem Planeten stattfinden, dessen Oberflächenbedingungen in den engen Bereich der Bedingungen fallen, die komplexes Leben unterstützen. Aber Leben in der Tiefe ... das ist eine andere Geschichte.

Thomas Gold
Ithaca, New York
Februar 2001

Anmerkungen

KAPITEL 1

1. Die Idee, dass Kohlenwasserstoffe nicht biologischen Ursprungs sind, habe ich erstmals in einem Meinungsartikel veröffentlicht: "Rethinking the origins of oil and gas", Wall Street Journal, 8. Juni 1977. Die Idee wurde in meinem 1979 erschienenen Artikel "Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing", Journal of Petroleum Geology1(3): 3-19, ausführlicher entwickelt. Siehe auch Thomas Gold und Steven Soter, 1980. "The deep-earth gas hypothesis", Scientific American 242: 154-61. Die Idee ist auch der Kern meines 1987 erschienenen Buches Power from the Earth: Deep Earth Gas-Energy for the Future (London: J.M. Dent & Sons).
2. Die Existenz und Benennung einer "tiefen, heißen Biosphäre" wurde erstmals in Thomas Gold, 1992, "The deep, hot biosphere", Proceedings of the National Academy of Sciences 89: 6045-49 vorgeschlagen.
3. P.N. Kropotkin gibt einen Überblick über die Geschichte der abiogenen Theorie über die Entstehung der Kohlenwasserstoffe in seinem Werk "On the history of science" von 1997: Professor N.A. Koudryavtsev and the development of the theory of origin of oil and gas," Earth Sciences History 16: 17- 20.
4. Meine Vorhersage von zehn tiefen, heißen Biosphären im Sonnensystem erscheint in Thomas Gold, 1992, "The deep, hot biosphere", Proceedings of the National Academy of Sciences 89: 6045-49.

KAPITEL 2

1. Ein aktueller Übersichtsartikel über die Entdeckung und die anschließenden Untersuchungen des Ökosystems der Tiefsee-Schlote ist Daniel L. Distel, 1998, "Evolution of chemoau totrophic endosymbiosis in bivalves", BioScience 48(4): 277-86. Siehe auch die Beiträge

Kapitel in David M. Karl, Hrsg., 1995, The Microbiology of Deep-Sea Hydrothermal Vents (Boca Raton: CRC Press).

2. Für einen Überblick über die Veröffentlichungen, die über Methanotrophe in den Gemeinschaften der Tiefsee-Schlote und als Symbionten der Makrofauna berichtet haben, siehe Distell 1998, wie in Anmerkung 1 zitiert.
3. Thomas D. Brock, 1978, Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures (New York: Springer-Verlag).
4. C.K. Paull et al., 1984, "Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa", Science 226: 965-67. Auch M.C. Ken- nicutt et al., 1985, "Vent-type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana Slope", Nature 317: 351-52.
5. Über die Entdeckung der Höhle in Rumänien wurde berichtet in Serban M. Sarbu, Thomas Kane, and Brian K. Kinkle, 1996, "A chemoautotrophically based cave ecosystem," Science 272: 1953-55. Siehe auch Medienberichte in der Juni-Ausgabe 1996 von Science News (Bd. 149, S. 405) und in der Januar-Ausgabe 1997 von Discover (S. 59).
6. Über die bakteriellen Leichentücher in der mexikanischen Höhle wird berichtet in Charles Petit,1998, "The walls are alive," U.S. News and World Report, 9. Februar, S. 59-60.
7. J. Cynan Ellis-Evans und David Wynn-Williams, 1996, "A great lake under the ice", Nature 381: 644- 46.
8. Über das Interesse der NASA am Wostok-See wird berichtet in Richard Stone, 1998, "Russian outpost readies for otherworldly quest", Science 279: 658-61.

9. Die Bedingungen für die Bildung von Methanhydraten werden in Ian R. MacDonald, 1997, "Bottom line for hydrocarbons", Nature 385: 389-90, beschrieben.
10. K.A. Kvenvolden und L.A. Barnard, 1982, "Hydrates of natural gas in continental margins," in J.S. Watkins und C.L. Drake, eds., Studies in Continental Margin Geology, AAPG Memoir 34, pp. 631-40.
11. Ein Vergleich des nicht oxidierten Kohlenstoffs in Methanhydraten mit anderen Kohlenwasserstoffen findet sich in Carl Zimmer, 1997, "Their game is mud", Discover, Mai, S. 28-30.
12. W. Steven Holbrook et al., 1996, "Methane hydrate and free gas on theBlake Ridge from vertical seismic profiling", Science 273: 1840-43.
13. Ansammlungen von Methanhydraten im Permafrost und anderswo werden in Yuri F. Makogan, 1981, Hydrates of Natural Gas (Tulsa: Penn Well Books) diskutiert.
14. Über die rosa Würmer, die sich von Methanhydraten ernähren, wurde berichtet in (anonym), 1997, "Ice worms in the Gulf", Science 277: 769.
15. Die Schwellentemperatur für Hyperthermophile ist definiert in John A. Baross und James F. Holden, 1996, "Overview of hyperthermophiles and theirheat-shock proteins," Advances in Protein Chemistry 48: 1-34.
16. John Postage, 1994, The Outer Reaches of Life (Cambridge, England: Cambridge University Press) S. 15.
17. Dass Druck dazu beitragen kann, "die funktionelle Konfiguration von Makromolekülen" aufrechtzuerhalten, wird in Baross und Holden (Anmerkung 15) vorgeschlagen.
18. Spekulationen über die obere Temperaturgrenze des Lebens werden in Baross und Holden 1996 (Anm. 15) vorgestellt.
19. Thomas Gold, 1992, "The deep, hot biosphere", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 89: 6045-49.
20. Für einen Überblick über die Debatte darüber, ob mikrobielles Leben in der Tiefe einheimisch ist oder durch Oberflächenkontamination entsteht, siehe John Parkes und James Maxwell, 1993, "Some like it hot (and oily)", Nature 365: 694-95.
21. S. L'Harldon et al., 1995, "Hot subterranean biosphere in a continental oil reservoir", Nature 377: 223-24. Die Autoren behaupten, weil "die thermophilen Isolate wiederholt aus verschiedenen Bohrlöchern gewonnen wurden und in Medien gediehen, die den Bedingungen in den Bohrlöchern ähnlich waren", dass "diese Isolate Mitglieder einer tiefen einheimischen thermophilen Gemeinschaft sind."
22. W.S. Fyfe, 1996, "The biosphere is going deep", Science 273: 448. Eine frühe und oft zitierte Arbeit, die über hyperthermophiles Leben in einer Tiefe von 3 Kilometern in Ölreservoirs in Alaska berichtet, ist K.O. Stetter et al., 1993, "Hyperthermophilic archaea are thriving in deep North Sea and Alaskan oil reservoirs", Nature 365: 743-45.
23. Richard Monastersky, 1997, "Signs of ancient life in deep, dark rock," Science News 152: 181.
24. U. Szevtzyk et al., 1994, "Thermophile, anaerobe Bakterien isoliert aus einem tiefen Bohrloch in Granit in Schweden", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 91: 1810-13.
25. Die Theorie der tiefen heißen Biosphäre (siehe Anmerkung 19) wird z. B. zitiert inJohn Parkes und James Maxwell, 1993, "Some like it hot (and oily)", Nature 365: 694-95; in William
J. Broad, 1993, "Strange new microbes hint at a vastsubterranean world", New York Times, 28. Dezember, S. C1, C14; Richard Monastersky, 1997, "Deep dwellers", Science News 151: 192- 93; und in J.R. Delaney et al., 1998, "The quantum event of oeanic crustal accretion: Impacts of diking at mid-ocean ridges", Science 281: 222-30.

26. Auch wenn Kohlenwasserstoffe (in der Regel Methan) in kristallinem Grundgestein weit entfernt von einer sedimentären Quelle entdeckt werden, wird vermutet, dass die Kohlenwasserstoffe biologischen Ursprungs sind. Mikroben, die sich davon ernähren, werden daher als abhängig von vergrabenen organischen Produkten der photosynthetischen, oberirdischen Biosphäre beurteilt. Siehe z.B. Karsten Pedersen, 1996, "Investigations of subterranean bacteria in deep crystalline bedrock", Canadian Journal of Microbiology 42: 382-
91. Siehe auch Delaney et al., Anmerkung 25.
27. Todd O. Stevens und James P. McKinley, 1995, "Lithoautotrophe mikrobielle Ökosysteme in tiefen Basalt-Aquiferen", Nature 270: 450-54. Siehe auch den begleitenden Nachrichtenbeitrag von Jocelyn Kaiser, S. 377. Und siehe James K. Fredrickson und Tullis C. Onstott, 1996, "Microbes deep inside the earth", Scientific American, Oktober, S. 68-73.
28. Stevens und McKinley (Anm. 27) schreiben: "Hohe Konzentrationen von gelöstem Methan wurden lokal in der Columbia River Basalt Group beobachtet, und Erdgas wurde Anfang dieses Jahrhunderts kommerziell ausgebeutet, aber der Ursprung des Gases ist ungewiss."
29. Petra Rueter et al., 1994, "Anaerobic oxidation of hydrocarbons in crude oil by new types of sulphate-reducing bacteria", Nature 372: 455-58.
30. Die Geschichte von Carl Woeses erfolgreichem Versuch, die taxonomische Klassifizierung des Lebens grundlegend zu revidieren, wird erzählt in Virginia Morell, 1997, "Microbiology's scarred revolutionary", Science 276: 699-702.
31. C.J. Bult et al., 1996, "Complete genome sequence of the methanogenic archaeon Methanococcus jannaschii, "Science 273: 1058-73.

KAPITEL 3

1. Ich habe hier Teile einer eingeladenen Rede, die ich 1988 auf der IBM-Konferenz "Science and the Unexpected" gehalten habe. Die Rede wurde später transkribiert und als "New ideas in science" in einer Ausgabe des Journal of Scien- tifc Exploration 3(2):103-12 veröffentlicht. Sie wurde im selben Jahr auch als "The inertiaof scientific thought", Speculations in Science and Technology 12:245-53 veröffentlicht.
2. Meine früheste Schrift über die Erdgastheorie ist mein 1977 erschienener Aufsatz "Rethinking the origins of oil and gas", Wall Street Journal, 8. Juni. Spätere Schriften umfassen Thomas Gold und Steven Soter, 1980, "The deep-earth gas hypothesis", Scientific American 242: 154-61; und Thomas Gold, 1985, "The origin of natural gas and petroleum and the prognosis for future supplies", Annual Review of Energy 10: 53-77.
3. Der Erdölgeologe und Tiefengas-Unternehmer Robert A. Hefner, III, war von Anfang an sehr an der Tiefengastheorie interessiert und unterstützte sie. Siehe sein 1993 erschienenes "New thinking about natural gas," in David G. Howell, Hrsg., The Future of Energy Gases, USGS Professional Paper 1570.
4. Bald nachdem ich meine Idee einer tiefen heißen Biosphäre entwickelt hatte (damals "A hot, deep biosphere" genannt), reichte ich einen Artikel mit diesem Titel bei Nature ein. Das war im Juni 1983. Die Arbeit wurde abgelehnt. Im Mai 1988 versuchte ich es erneut, diesmal mit dem Titel "Have we discovered a second domain of life on the earth?" Ich bezog mich natürlich auf eine zweite und unabhängige Biosphäre in der tiefen Erde. Es war klar, dass auch für diese Arbeit eine Ablehnung unvermeidlich war, also zog ich sie zurück und reichte sie bei einer Zeitschrift ein, die zwar sehr angesehen ist, aber nicht von Peer Review dominiert wird. Jedes Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften, wie ich es war, konnte einen Aufsatz veröffentlichen lassen, vorausge-

setzt, dass die Zustimmung von zwei anderen Mitgliedern der Wahl des Autors eingeholt werden konnte. So wurde 1992 in den Proceedings of the National Academy of Sciences, USA (89: 6045-49) mein "Deep, hot biosphere ", mit der Zustimmung von Dr. Carl Woese und Dr. Gordon MacDonald.

5. E.M. Galimov, 1975, Carbon Isotopes in Oil- Gas geology, NTIS Übersetzung, S. 335-36.
6. Die Entstehung der Erde und der primordiale Ursprung der Kohlenwasserstoffe wird in meinem Kapitel "Kohlenstoff - das Element des Lebens" ausführlicher behandelt: Was ist sein Ursprung auf der Erde?", Hermann Bondi und Miranda Weston-Smith, Hrsg., 1993, The Universe Unfolding (Oxford, England: Clarendon Press).
7. Diese Vorstellung einer kühlen frühen Erde wird in meinem Aufsatz von 1985 "The origin of natural gas and petroleum, and the prognosis for future supplies", Annual Review of Energy 10: 53-77, ausführlicher diskutiert.
8. E.B. Chekaliuk, 1976, "The thermal stability of hydrocarbon systems in geothermodynamic conditions", in P. N. Kropotkin, ed., 1980, Degasatsiia Zemli i Geotektonica (Moskau: Nauka), pp. 267-72.
9. Diese Erörterung der thermodynamischen Stabilität von Kohlenwasserstoffen in der Tiefe ist meinem in Anmerkung 6 zitierten Aufsatz von 1985 entnommen.

KAPITEL 4

1. Diese Reihe von Behauptungen, die die abiogene Theorie stützen, wird in meinem 1993 erschienenen Aufsatz "The origin of methane in the crust of the earth" (Der Ursprung von Methan in der Erdkruste), in David G. Howell, Hrsg., The Future of Energy Gases, USGS Professional Paper 1570, ausführlicher dargestellt.
2. Koudryavtsevs Regel wird diskutiert in P.N. Kropotkin, 1997, "On the history of science: Professor N.A. Koudryavtsev and the development of the theory of origin of oil and gas," Earth Sciences History 16: 13-20.
3. Schätzungen über das mögliche Volumen von Methanhydraten knapp unter der Oberfläche in kalten Regionen (und unterhalb der Tiefsee) wurden von Keith A. Kvenvolden, 1988, "Methane hydrate: A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?" Chemical Geology 71: 41-51; und auch von G.J. MacDonald, 1990, "Role of methane clathrates in past and future climates," Climatic Change 16: 247- 81. Siehe auch Keith A. Kvenvolden, 1993, "A primer on gashydrates," in David G. Howell, ed., The Future of Energy Gases, USGS Professional Paper 1570.
4. Nachfüllende Kohlenwasserstoffreservoirs sind dokumentiert in Robert F. Mahfoud und James N. Beck, 1995, "Why the Middle East fields may produce oil forever", Offshore, April, S. 56-62. Eine Dokumentation der Nachfüllung von Lagerstätten entlang der US-Golfküste findet sich in Jean K. Whelan, 1997, "The dynamic migration hypothesis", Sea Technology, September, S. 10-18. Siehe auch Jean K. Whelan et al., 1993, "Organic geochemical indicators of dynamic fluid flow processes in petroleum basins", Advances in Organic Chemistry 22: 587- 615.
5. Meine Diskussion über Karbonate ist in meinem in Anmerkung 1 zitierten USGS-Papier von 1993 ausführlicher dargestellt.
6. Unter Erdölgeologen ist die Ansicht weit verbreitet, dass ein Mangel an schweren Isotopen in Methan von mehr als 2 Prozent (20 Promille in den konventionellen Einheiten) dieses Gas als "zweifelsfrei" biogenen Ursprungs kennzeichnet. Diese Ansicht wird trotz vieler Beobachtungen vertreten, die in krassem Widerspruch dazu stehen, und trotz der Erwartung, dass eine solche Fraktionierung bei der Migration von Methan durch dichte Gesteine ohne weiteres auftreten würde. Wie stark diese Ansicht von einigen vertreten

wird und wie einflussreich sie war, zeigt zum Beispiel ein Papier von P.J. McCabe, D.L. Gautier, M.D. Lewan und C. Turner (Mitglieder des U.S. Geological Survey) in "The future of energy gases", USGS Circular 1115, 1993. Sie schlussfolgern: "Bisher wurden keine wirtschaftlichen Gasansammlungen gefunden, die nicht durch die organische Theorie erklärt werden können. organischen Theorie erklärt werden können. Geochemische Analysen von produzierenden Feldern in den Vereinigten Staaten zum Beispiel zeigen eindeutig, dass über 99 Prozent des Gases organischen Ursprungs sind".

Die Frage, um welche Art von geochemischer Analyse es sich handelt, die dies eindeutig zeigt, wurde trotz wiederholter Nachfragen nie beantwortet. Die einzigen Arten von Analysen, um die es sich handeln könnte, wären die Assoziation mit anderen Gasen und das Kohlenstoff- Isotopenverhältnis des Methans. Das Kohlenstoff-Isotopenverhältnis ist mit ziemlicher Sicherheit der Effekt, an dem diese Autoren diese unbewiesene Behauptung aufgehängt haben, denn höchstwahrscheinlich zeigen über 99 Prozent des kommerziellen Methans einen Mangel an Kohlenstoff-13, der größer ist als irgendein willkürlicher Wert, den sie für die Unterscheidung zwischen biogenen und abiogenen Gasen halten. Außerdem weist ein Teil des kommerziellen Methans einen viel größeren Mangel auf, als durch die Photosynthese irgendeiner bekannten Vegetation erklärt werden kann (-75 Promille), so dass in jedem Fall eine Fraktionierung entlang eines Migrationspfades geltend gemacht werden muss.

Die Assoziation mit Helium wird in ihrem Papier nicht erwähnt, würde aber eigentlich jeden biogenen Ursprung ausschließen. Das texanische Hugoton-Feld beispielsweise ist eine bedeutende Erdgasförderregion, und die Gasfelder enthalten mehr Helium, als durch die Radioaktivität in den Sedimenten in ihrem gesamten Bereich hätte erzeugt werden können, selbst wenn nichts ausgetreten wäre. Nur eine kontinuierliche Zufuhr des Gasgemisches aus sehr tiefen Schichten kann dies erklären.

Die Autoren schreiben in der gleichen Arbeit: "Es ist klar, dass Methan rein anorganischer Natur sein kann, und in der Tat sind sich die meisten Wissenschaftler einig, dass zumindest ein Teil des Methans auf der Erde nicht organischen Ursprungs ist. Methan, das aus mittelozeanischen Rücken austritt, enthält zum Beispiel etwas, von dem man allgemein annimmt, dass es sich um Methan aus Pflanzenleder handelt. Aber auch wenn die Existenz von anorganischem Methan bekannt ist, bezweifeln die meisten Wissenschaftler, dass jemals kommerzielle Mengen des Gases aus dem Erdmantel entweichen, da Kohlendioxid und Wasser die Hauptflüssigkeiten im Erdmantel sind." (Die Kursivschrift ist von mir.)

Es ist erwähnenswert, dass das aus dem Ozean austretende Methan, bei dem sie sich einig sind, dass es abiogen ist, auch einen erheblichen Mangel an Kohlenstoff-13 aufweist, der von -15,0 bis -17,6 (in der üblichen Notation) reicht, was zeigt, dass auch dort eine Isotopenfraktionierung stattgefunden hat. Warum finden wir dann aus dem Mantel stammende Diamanten und Graphit? Diese werden nicht aus Kohlendioxid und Wasser hergestellt. Und warum finden wir in allen Tiefenbohrungen, die durchgeführt wurden, viel größere Mengen an Methan als an CO^2?

7. Die Einheitlichkeit der Isotopenverhältnisse von Karbonaten mit sehr unterschiedlichem Alter wird in M. Schidlowski, R. Eichmann und C.E. Jung, 1975, "PreCambrian sedimentary carbonates: Carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget", Precambrian Research 2: 1-69.
8. Ein weiterer Punkt, der für die abiogene Theorie spricht, betrifft die Menge an freiem Sauerstoff in der Atmosphäre. Wenn alle Kohlenwasserstoffe in der Erdkruste auf das Eingraben von Oberflächenleben zurückzuführen wären, dann wäre ein sehr großer Überschuss an freiem Sauerstoff (ein Nebenprodukt der Photosynthese) in der Atmosphäre zurückgeblieben - mehr als 10 Atmosphären Sauerstoff allein. Die heutige Atmo-

sphäre enthält nur etwa ein Fünftel einer Atmosphäre Sauerstoff, und es erscheint zweifelhaft, dass ein 50-mal größerer Überschuss hätte verschwinden können, ohne eine deutliche Spur zu hinterlassen. Wenn andererseits der größte Teil der Ablagerungen von nicht oxidiertem Kohlenstoff im Boden aus nicht oxidierten, kohlenstoffhaltigen Fluiden stammt, die von unten nach oben kommen, und nicht aus Materialien, die von der Oberfläche heruntergeholt wurden, dann würde die Diskrepanz verschwinden.

Die starke Assoziation von Helium mit Methan wird in vielen Abhandlungen dargestellt, von denen ich hier eine Auswahl wiedergeben möchte:

9. T. Gold und M. Held, 1987, "Helium-Stickstoff-Methan-Systematik in Naturgasen von Texas und Kansas", Journal of Petroleum Geology 10: 415-24.
10. J.A. Welhan und H. Craig, 1983, "Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21N on the East Pacific Rise," in P.A. Rona, ed., Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers, (Plenum Press), 391-409.
11. H. Craig gibt einen guten Überblick über den Isotopentrennungsprozess bei verschiedenen Untergrundbedingungen und verschiedenen Gasmischungen in seinem 1968 erschienenen Artikel "Isotope separation by carrier diffusion", Science 159: 93-96 (5. Januar 1968). Es gibt mehrere andere Fraktionierungsprozesse für Kohlenstoffisotope, die in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert werden und den Rahmen dieses Buches sprengen würden, aber die Prozesse, die auf der Diffusionsgeschwindigkeit basieren, scheinen die dominierenden zu sein.
12. V.F. Nikonov, 1969, "Relation of helium to petroleum hydrocarbons", Dokl. Akad. Nauk SSSR. Earth Sci. Sect. 188: 199-201.
13. V.F. Nikonov, 1973, "Formation of helium- bearing gases and trends in prospecting for them," Internat. Geol. Rev. 15: 534-41. Nikonov zeigt nicht nur den hohen Grad der Assoziation zwischen natürlichen Kohlenwasserstoffgasen und Ölen, sondern auch, dass bestimmte Mischungen von Erdölkohlenwasserstoffen weltweit stärker mit Helium angereichert sind als andere Arten.
14. L.A. Pogorski und G.S. Quirt, 1978, "Helium emanometry in exploring for hydrocarbons: Part 1," Proceedings of Symposium 1 on Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas, S. 124-29.
15. A.A. Roberts, 1978, "Helium emanometry in exploring for hydrocarbons (Helium-Emanometrie bei der Suche nach Kohlenwasserstoffen): Part II." Proceedings of Symposium II on Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas, S. 136- 49. Die Assoziation von Helium mit Kohlenwasserstoffen zeigt sich auch in den Ergebnissen, dass die Heliumversickerung über Öl- und Gasfeldern so deutlich ist, dass Helium-Oberflächenmessungen eine gute Methode zur Lokalisierung von darunter liegenden Kohlenwasserstofffeldern darstellen. Dies zeigt, dass Helium nicht nur allgemein in einem Gebiet aufsteigt und nur gelegentlich in einer Falle festgehalten wird, die auch Kohlenwasserstoffe enthält (wie manchmal angenommen wurde), sondern dass das Vorhandensein von Helium an der Oberfläche die besondere Lage eines darunter liegenden Kohlenwasserstoff- und Heliumfeldes spezifiziert.
16. W. Dyck und C.E. Dunn, 1986, "Helium and methane anomalies in domestic well waters in southwestern Saskatchewan, Canada, and their relationship to other dissolved constituents, oil and gas fields, and tectonic patterns", Journal of Geophysical Research 91: 12343-53.

Das Häufigkeitsverhältnis der beiden stabilen Isotope von Helium, Helium-4, das häufige, und das seltene Helium-3, wurde an vielen Orten gemessen (obwohl die Messung sehr verfeinerte Techniken erfordert). Die Ergebnisse sind für die Diskussion über den Ursprung der Kohlenwasserstoffe von großer Bedeutung, da eine klare Tendenz besteht, dass ein etwas höherer Anteil von He-3 in Helium enthalten ist, das den Beweis dafür

liefert, dass es aus sehr tiefen Schichten aufgestiegen ist. Für diesen Effekt hat man die (mit ziemlicher Sicherheit richtige) Erklärung gefunden, dass kleine Mengen dieses Gases aus einem Gemisch stammen, das in die sich bildende Erde eingebracht wurde und sich in den einfallenden Festkörpern verfing. Die Gase der Sonne und des Sonnensystems enthalten die ursprüngliche Isotopenmischung, die von den Kernöfen in den Sternen geliefert wurde, und diese hat eine viel höhere Konzentration von He-3 als jegliches Helium auf der Erdoberfläche, das durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium entstanden ist und fast ausschließlich He-4 bildet. Die Ausgasung von Helium wird die ursprüngliche Mischung aus den äußeren Schichten entfernt haben, und daher sehen wir erhöhte Konzentrationen von Helium-3 nur aus Tiefen, aus denen diese Ausgasung noch nicht vollständig erfolgt ist.

Dies ermöglicht es uns zwar, Gasquellen, die einen Überschuss anHe-3 enthalten, als aus einer gewissen Tiefe stammen, erlaubt es uns jedoch nicht zu schließen, dass Quellen, die keinen He-3-Überschuss aufweisen, aus flachen Ebenen stammen. Der Erdmantel ist nicht homogen und wird sich in verschiedenen Regionen ganz unterschiedlich verhalten haben. Die Ausgasung von Helium hängt davon ab, dass andere Gase durch die Bahnen hochgespült wurden. Eine Bahn, die schon lange gespült wurde, wird ihr primordiales Helium verloren haben und nur noch das aktuell gebildete He-4 liefern, während eine Bahn, die erst in jüngerer geologischer Zeit erschlossen wurde, noch ihre primordialen Bestandteile aufweist. Die Heterogenität des Mantels, die Ursprungstiefe des Gases und das Alter des Weges nach oben werden zusammen das Isotopenverhältnis bestimmen, das beobachtet werden wird. Kohlenwasserstoffreiche Gebiete weisen besonders häufig erhöhte Werte von He-3 auf, was ein starkes Argument dafür ist, dass sie einen tiefen Ursprung haben. Gebiete, die keinen solchen Überschuss aufweisen, können einen flacheren Ursprung gehabt haben, aber sie können auch einen tiefen Ursprung gehabt haben, von dem sie auf älteren, besser geebneten Pfaden aufgestiegen sind.

Ich zitiere hier ein paar Arbeiten aus dem großen Fundus der Literatur über die Beziehungen von He-3 zu Erdöl:

17. IN. Tolstikhin, B.A. Mamyrin, E.A. Baskov, I.L. Kamenskii, G.A. Anufriev, and S.N. Surikov, 1975, "Helium isotopes, in gases from hot springs of the Kurile-Kamchatka vulcanic region," in
A.I. Tugarinov, ed., Recent Contributions to Geochemistry and Analytical Chemistry, (New York: John Wiley & Sons), 456-65.
18. IN. Tolstikhin, 1975, "Helium isotopes in the Earth's interior and in the atmosphere: A degassing model of the Earth." Earth Planet. Sci. Lett. 26: 88- 96.
19. H. Wakita und Y. Sano, 1983, "3He/4He ratios in CH4-rich natural gases suggest magmatic origin", Nature 305: 792-94.
20. J.A. Welhan, W. Rison, R. Poreda, und H. Craig, 1983, "Geothermal gases of the Mud Volcano
Area, Yellowstone National Park", EOS 64: 882.
21. H. Craig und J.E. Lupton, 1981, "Helium-3 and mantle volatiles in the ocean and the oceanic crust," The Oceanic Lithosphere, vol. 7. The Sea (New York: John Wiley & Sons), 391-428.
22. H. Craig, W.B. Clarke, and M.A. Beg, 1975, "Excess 3He in deep water on the East Pacific Rise," Earth Planet. Sci. Lett. 26: 125-32.
23. H. Craig, J.E. Lupton, J.A. Welhan, and R. Poreda, 1978, "Helium isotope ratios in Yellowstone and Lassen Park volcanic gases," Geophys. Res. Lett. 5: 897-900.
24. W. J. Jenkins, J. M. Edmond, and J. B. Corliss, 1978, "Excess 3He and 4He in Galapagos submarine hydrothermal waters," Nature 272: 156- 58.

25. J.E. Lupton und H. Craig, 1975, "Excess 3He in oceanic basalts: Evidence for terrestrial primordial helium", Earth Planet. Sci. Lett. 26: 133- 39.
26. J.E. Lupton und H. Craig, 1981, "A major helium-3 source at 15S on the East Pacific Rise", Science 214: 13-18.
27. J.E. Lupton, G.P. Klinkhammer, W.R. Normark, R. Haymon, K.C. MacDonald, R.F. Weiss, and H. Craig, 1980, "Helium-3 and manganese at the 21N East Pacific Rise hydrothermal site," Earth Planet. Sci. 50: 115-27.

KAPITEL 5

1. Diese Serie von vier Behauptungen zur Unterstützung der biogenen Theorie erscheint in meinem 1993 erschienenen "The origin of methane in the crust of the earth," in David G. Howell, ed., The Future of Energy Gases, USGS Professional Paper 1570.
2. Ich habe die Lösung des Erdölparadoxons durch die tiefe heiße Biosphäre
des Erdölparadoxons über einen längeren Zeitraum, beginnend vor fast zwanzig Jahren. Bei der Vorbereitung dieser Notizen haben eine Assistentin (Connie Barlow) und ich meine Akten durchforstet und versucht, schriftliche Äußerungen über meinen Wandel im Denken zu finden, als ich begann, die Theorie der tiefen Erdgase durch die Theorie der tiefen heißen Biosphäre zu ergänzen, aber noch nicht zu einer vollständigen Einschätzung der Beziehung gekommen war. Zwei Artikel erregten unsere Aufmerksamkeit. In der Abschrift eines Interviews, das John Maddox für die BBC führte und das im Juni 1978 im Rahmen des Radioprogramms "Scientifically Speaking" ausgestrahlt wurde, wird deutlich, dass ich noch nicht begonnen hatte, die Idee zu unterhalten, dass Mikroben in der Tiefe leben könnten - oder zumindest war ich nicht bereit, diese Hypothese zu äußern. Ich sagte: "In den letzten Jahren hat man viel mehr Gas gefunden, tiefer als jedes Öl und sehr methanhaltig, ohne andere Kohlenwasserstoffe. Ich neige zu der Annahme, dass es sich größtenteils um urzeitliches Material handelt, aber die Tatsache, dass es zweifellos biogenen Kohlenwasserstoff im Boden gibt, macht es natürlich sehr schwer, die beiden zu unterscheiden."
Fünf Jahre später war ich bereit, die Diskussion viel weiter zu führen. In einem Interview, das in der März-Ausgabe 1983 der Zeitschrift Montana Oil veröffentlicht wurde, sagte ich Folgendes: "Der genuin biologische Gehalt der meisten Öle ist nur ein kleiner Bruchteil und [ist] keineswegs schwer zu erklären. Wenn sich ein Öl in fossilhaltigen Sedimenten befindet, wird es sicherlich das gesamte öllösliche biologische Material auslaugen. Außerdem ist Öl eine sehr begehrte Substanz für verschiedene Formen der Mikrobiologie, und wir sehen deutlich, dass dort, wo die Temperatur des Öls niedrig genug ist, damit dieses gedeihen kann, die biologischen Marker vorhanden sind."
Zwei Monate später, im Juni 1983, reichte ich meinen Artikel "A hot, deep biosphere" bei Nature ein. Siehe Anmerkung 4 in Kapitel 3 für die Geschichte meines Versuchs, diese Idee zu veröffentlichen.
3. Guy Ourisson, Pierre Albrecht und Michel Rohmer, August 1984, "The microbial origin of fossil fuels", Scientific American 251(2): 44-51.
4. Meine Antwort auf den Artikel von Ourrison et al. wurde im November 1984 veröffentlicht, Scientific American 251(5): 6.
5. Im Jahr 1984, zur Zeit des Ourisson-Papiers, wurde noch nicht zwischen Bakterien und Archaeen unterschieden.
6. Robert Robinson, 1963, "Duplex origin of petroleum", Nature 199: 113-14.
7. Meine Schätzung der mikrobiellen Biomasse in der Tiefe wurde veröffentlicht in Thomas Gold, 1992, "The deep, hot biosphere", Proceedings of the National Academy of Sciences 89: 6045-49.

8. Während sich dieses Buch in der Phase der Seitenkorrektur befand, wurde eine wichtige Arbeit veröffentlicht, die meine Projektionen einer sehr großen Biomasse innerhalb der tiefen, heißen Biosphäre qualitativ bestätigt: J.R. Delaney et al., 1998, "The quantum event of oceanic crustal accretion: Impacts of diking at mid-ocean ridges", Science 281: 222-30.
   Die Autoren beschreiben ein bisher unbekanntes Phänomen der plötzlichen und massiven Freisetzung von hydrothermalen Fluiden auf dem Ozeanboden. Da diese Fluide "massive Ergüsse mikrobieller Produkte" enthielten, schlussfolgerten die Autoren, dass die biologische Aktivität vor dem Fluidauswurf in "wärmeren Lebensräumen unter dem Meeresboden" stattgefunden haben muss. Ihre Schlussfolgerung: "Die Zone in der Kruste, die von Thermophilen besetzt ist, kann sehr groß sein." Sie stellten auch fest: "Massive und anhaltende Produktion von mikrobiellen Produkten in Verbindung mit der Eindeichung unterstützen die jüngsten Postulate einer bedeutenden tiefen heißen Biosphäre innerhalb der Erde." Meine Arbeit von 1992 ist unter den Referenzen, die mit dieser Aussage zitiert werden.
   Aufgrund meiner Behauptung (in Kapitel 8), dass aufsteigende Methanfahnen die Ursache vieler Erdbeben sind, ist die Beobachtung von Delaney et al. dass "Erdbebenschwärme" die Freisetzung der hydrothermalen Fluide zu begleiten scheinen, für mich von großem Interesse.
9. Ourisson et al. schrieben: "Wegen des Altersunterschieds und weil man annahm, dass die organischen Verbindungen in Kohle und Erdöl aus unterschiedlichen Quellen stammen, war die Übereinstimmung der Peaks im C27- bis C32-Bereich unerwartet." Guy Ourisson, Pierre Albrecht und Michel Rohmer, 1984, "The microbial origin of fossil fuels", Scientific American 251 (2): 44-51.
10. K.R. Pedersen und J. Lam, 1970, "Präkambrische organische Verbindungen aus dem Ketilidian von Südwestgrönland", Gronlands Geologiske Unders. Bull., No. 82.
11. G. Henderson, 1964, "Oil and gas prospects in the Cretaceous-Tertiary basin of west Greenland", Geol. Survey Greenland Rept., Nr. 22.
12. C.H. Hitchcock, 1865, "The Albert Coal, or Albertite, of New Brunswick", Amer. J. Sci, 2nd Ser. 39: 267-73.
13. Diese und viele weitere Beispiele für Anomalien in Kohlelagerstätten werden in Kapitel 9 meines 1987 erschienenen Buches "Power from the Earth" (London: J.M. Dent) behandelt.
14. H.R. Wanless, 1952, "Studies of field relations of coal beds", in Second Conference on the Origin and Constitution of Coal, Nova Scotia Department of Mines, S. 148-80.

KAPITEL 6

1. Mein Vortrag wurde in Schweden im Svenska Dagbladet (17. Oktober 1983) unter dem Titel "Deep natural gas in Sweden?" (Akte Nr. 235)
2. Einen ausführlicheren Bericht über die Siljan-Ergebnisse veröffentlichte ich in der Ausgabe des Oil and Gas Journal vom 14. Januar 1991, S. 76-78. Siehe auch mein 1988 erschienenes Buch "The deep earth gas theory with respect to the results from the Gravberg-1 well," in A. Boden and K.G. Eriksson, Deep Drilling in Crystalline Bedrock (New
   York: Springer-Verlag) S. 18-27.
3. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse über den Magnetitschlamm schrieb ich 1991, "Accumulations of fine-grained magnetite in a deep borehole in Sweden", unveröffentlicht. (Akte Nr. 275)

4. Die beiden Laboranalysen wurden von J.M. Knudsen et al. amOrsted Laboratory der Universität Kopenhagen und von R. Reynolds et al. am USGS in Denver durchgeführt. Beide sind in meiner Akte Nr. 652.
5. Ein Bericht über eine dritte Laboranalyse, einschließlich einer Neutronenaktivierungs-analyse, die von C. Orth am Los Alamos National Laboratory durchgeführt wurde, wurde mir in einem privaten Bericht mitgeteilt; Akte Nr. 652.
6. Eine Zusammenfassung der Philp-Befunde ist in meiner grünen Akte Nr. 652.
7. U. Szewzyk et al., 1994, "Thermophilic, anaerobic bacteria isolated from a deep bore-hole in granite in Sweden", Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) 91: 1810-13.
8. Zur Zeit der Siljan-Bohrung wurde die biologische Produktion von ultrafeinkörnigem Magnetit durch anaerobe Mikroben bekannt gemacht, in: Derek R. Lovley, John F. Stolz, Gordon L. Nord, and Elizabeth J.P. Phillips, 1987, "Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron- reducing microorganism," Nature 330: 252-54. Siehe auch N.H.C. Sparks et al., 1990, "Structure and morphology of magnetite anaerobically produced by a marine magnetotactic bacterium and a dissimilatory iron-reducing bacterium", Earth and Planetary Science Letters 98: 14-22.
9. W.E. Henry, 1989, "Magnetic detection of hydrocarbon microseepage in a frontier explora-tion region," Bulletin of the Association of Petroleum Geochemical Explorationists 5: 18-29.
10. P.N. Kropotkin, 1997, "Zur Geschichte der Wissenschaft: Professor N.A. Koudrya-vtsev (1893-1971) und die Entwicklung der Theorie des Ursprungs von Öl und Gas", Earth Sciences History 16(1):17-20.

KAPITEL 7

1. D.G. Pearson, G.R. Davies, P.H. Nixon, and H.J. Milledge, 1998, "Graphitized diamond from a peridotite massif in Morocco and implications for anomalous diamond occurrenc-es," Nature 338: 60- 62.
2. C.E. Melton und A.A. Giardini, 1974, "The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil", American Mineralogist 59: 775-82.
3. Pierre Cartigny, Jeffrey W. Harris, und Marc Javoy, 1998, "Eclogitic diamond formation at Jwaneng: No room for a recycled component." Science 280: 1421-23.
4. Konrad B. Krauskopf, 1982, Introduction to Geochemistry (London: McGraw-Hill) S. 395.
5. P.N. Kropotkin, 1997, "Zur Geschichte der Wissenschaft: Professor N.A. Koudryavtsev und die Entwicklung der Theorie über den Ursprung von Öl und Gas," Earth Sciences History 16: 13-20.
6. Ein wichtiges Beispiel für eine wissenschaftliche Arbeit, die über eine Assoziation zwischen Gold und Kohlenwasserstoffen berichtet (und dennoch eine hydrothermale Ur-sache für das Metallvorkommen annimmt), ist A.C. Barnicoat et al., 1997, "Hydrother-mal gold mineralization in the Witwatersrand Basin", Nature 386: 820-24.
7. Tabellen zur Biomineralisation finden sich in Barry S.C. Leadbeater undRobert Riding, Hrsg., 1986, Biomineralization in Lower Plants and Animals (Oxford, England: Claren-don) S. 4; und auch in Lynn Margulis und Dorion Sagan, 1995, What Is Life? (New York: Simon & Schuster).

KAPITEL 8

1. Schlammvulkane werden in zahlreichen russischen Publikationen diskutiert. In der englischsprachigen wissenschaftlichen Literatur ist ein interessanter, illustrierter Artikel

MartinHovland, Andrew Hill und David Stokes, 1997, "The structure and geomorphology of the Dashgill mud volcano, Azerbaijan", Geomorphology 21:1-15. Schlammvulkane werden auch in meinem 1987 erschienenen Buch "Power from the Earth" behandelt.

2. Die umfassendste Darstellung von Pockmarks und anderen Meeresbodenmerkmalen, die ich als durch die Freisetzung von Gasen, hauptsächlich Methan, verursacht interpretiere, ist in M. Hoveland und A.G. Judd, 1988, Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment (London: Graham and Trotman). Das größte bekannte Pockmark-Feld und die Auswirkungen seiner Methanfreisetzung werden in S. Lammers, E. Suess, und M. Hovland, 1995, "A large methane plume east of Bear Island (Barents Sea): Implications for the marine cycle", Geol. Rundsch 84:59-66.
3. Martin Hovland et al., 1994, "Fault-associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and northwest Australia," Marine and Petroleum Geology 11(2):232-46.
4. Ich danke Steven Soter dafür, dass er mich auf den zeitlichen Zusammenhang zwischen dem Rückgang der Gastheorie von Erdbeben und der Erfindung des Seismographen aufmerksam gemacht hat.
5. Steven Soter hat über viele Jahre hinweg Erdbebendaten recherchiert und an Abhandlungen und Artikeln über Tiefengas als Ursache von Erdbeben mitgewirkt. Zu diesen Schriften gehören Thomas Gold und Steven Soter, 1980, "The deep- earth gas hypothesis", Scientific American 242: 154-61; und Thomas Gold und Steven Soter, 1984/85, "Fluid ascent through the solid lithosphere
and its relations to earthquakes", Pageoph 122: 492-530. Siehe auch das Kapitel über Erdbeben in meinem Buch von 1987, Power from the Earth (London: J.M. Dent).
6. Isaac Newton, 1730, Optics, 4. Aufl., q. 31, S. 354-55.
7. John Michell, 1761, "Conjectures concerning the cause, and observations upon the phenomena, of earthquakes", Philosophical Transactions of the Royal Society 51: 566-634.
8. Liao-ling Meteorological Station, 1977, "The extraordinary phenomena in weather observed before the February 1975 Hai-cheng earthquake", Acta Geophys. Sinica 20: 270-75.
9. Yuji Sano und Hiroshi Wakita, 1987, "Helium isotope evidence for magmatic gases in Lake Nyos, Cameroon," Geophysical Research Letters 14: 1039-41.
10. Leider habe ich nur ein unvollständiges Zitat für das Tangshan-Erdbeben und konnte das vollständige Zitat nicht abrufen. Das Zitat stammt aus einem Bericht von J. Li mit dem Titel "Earthquake: A harvest of agony" (Eine Ernte der Qualen), der in einer Ausgabe der Los Angeles Times vom Oktober 1980 erschien.
11. Soweit ich weiß, gibt es Erdhügel auch in anderen Regionen Nordamerikas. Interpretationen tendieren dazu, die Ursache ihrer Entstehung als mysteriös zu bezeichnen, obwohl sie vielleicht auf Erdwerke zurückzuführen sind, die von Paläo-Indianern absichtlich errichtet wurden.
12. Für einen Überblick über die für Erdbeben angenommenen Belastungsmechanismen und die Probleme, solche Mechanismen zur Erklärung tiefer Erdbeben zu verwenden, siehe HarryW. Green II und Heidi Houston, 1995, "The mechanics of deep earthquakes", Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 23: 169-213. Die Autoren teilen
Die Autoren teilen meine Ansicht, dass unter Druck stehende Flüssigkeiten in Porenräumen Erdbeben in Tiefen erklären können, in denen Dehnung keine Rolle spielen kann, aber sie postulieren Wasser und nicht Kohlenwasserstoffe als die durchdringende Flüssigkeit. Wie in Kapitel 3 erläutert, stimme ich auch mit der Behauptung der Autoren nicht

überein, dass "es extrem unwahrscheinlich ist, dass eine fluidgefüllte Porosität ... bis in große Tiefen aufrechterhalten werden könnte."

KAPITEL 9

1. Infrarot-Phototaxis (Richtungsbestimmung durch Strahlung) an heißen Ozeanschloten wird als Vorläufer der Photosynthese vorgeschlagen in Euan G. Nisbet, 1995, "Archaean ecology: A review of evidence for the early development of bacterial biomes,and speculations on the development of a global-scale biosphere," in M.P. Coward and A.C. Ries, eds., Early Precambrian Processes, Geological Society of London Special Publication No. 95, pp. 27-51. Siehe auch E.G. Nisbet und C.M.R. Fowler, 1996, "Some liked it hot", Nature 382: 404-5.
2. Die Berechnung geht davon aus, dass jeder Affe nur eine Chance erhält, die erforderliche Anzahl von Tasten (39), die der ersten Zeile eines Shakespeare-Sonetts entsprechen, zufällig zu drücken.
3. Robert V. Miller, 1998, "Bacterial gene swapping in nature", Scientific American, Januar, S. 67-71.
4. Vilmos Csanyi schlug 1989 in seinem Buch Evolutionary Systems and Society (Durham, NC: Duke University Press) vor, dass symbiotische Fusionen von Gemeinschaften von Mikroorganismen am besten die grundlegenden Unterschiede in den Zelltypen des Tierkörpers erklären könnten.
5. Linus Pauling, 1959, General Chemistry, 2nd ed. (San Francisco: W.H. Freeman), S. 599.
6. Unterstützung für die Gentausch-Sichtweise des frühen Lebens findet sich in Elizabeth Pernise, 1998, "Genome data shake tree of life", Science 280: 672-74.

KAPITEL 10

1. Jon S. Nelson und E.C. Simmons, 1995, "Diffusion of methane and ethane through the reservoir cap rock: Implications for the timing and duration of catagenesis", American Association of Petroleum Geologists Bulletin, July 1995, 79(7):11064-74.
2. David M. Karl, 1995, "Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities," in David M. Karl, ed., The Microbiology of Deep-Sea Hydrothermal Vents (Boca Raton, FL: CRC Press), p. 109.
3. Für einen Überblick über die Veröffentlichungen, die über Methanotrophe in den Gemeinschaften der Tiefsee-Schlote und als Symbionten der Makrofauna berichtet haben, siehe Daniel L. Distel, 1998, "Evolution of chemoautotrophic endosymbiosis in bivalves", BioScience 48(4): 277-86.
4. John Postgate, 1994, The Outer Reaches of Life (Cambridge, England: Cambridge University Press), S. 29.
5. Klimamodellberechnungen für die Venus finden sich in James F. Kasting, 1988, "Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus", Icarus 74: 472-94. Siehe auch sein 1997 "Habitable zones around low mass stars and the search for extraterrestrial life," Origins of Life and Evolution of the Biosphere 27: 291-307.
6. Die Zeit für das Einsetzen eines Runaway-Treibhauses auf der Erde wurde von James Lovelock und Michael Whitfield in ihrem 1982 erschienenen Werk "Life span of the biosphere", Nature 296: 561-63, geschätzt. Eine neuere Schätzung findet sich in Ken-Caldeira und James F. Kasting, 1992, "The lifespan of the biosphere revisited", Nature 360: 721-23.
7. Baerbel K. Lucchitta, Duwayne M. Anderson und Hitoshi Shoji präsentierten 1981 ein starkes Argument für die Vergletscherung des Mars in ihrem Buch "Did ice streams car-

ve Martian outflow channels?" Nature 290: 759-63. Siehe auch Hugh H. Kieffer etal., eds, Mars (Tucson: University of Arizona Press) S. 498-51.

8. Die Gletschertheorie wird auf die jüngsten Marsfotos angewandt in Jeffrey Winters, 1998, "A survey of ancient Mars", Discover, Juli, S. 113-17.
9. Die gigantische Größe des Olympus Mons auf dem Mars schafft eine Schwierigkeit, ihn als Lavavulkan zu erklären. Da Lava fast die gleiche Dichte wie das feste Gestein hat, ist es schwer vorstellbar, wie ein ausreichender Druck vorhanden sein könnte, um die Lava in ihrem späteren Stadium auf die Höhe der Landform zu drücken. Möglicherweise sollte man ihn sich als einen riesigen Pingo oder einen riesigen Schlammvulkan vorstellen.
10. D.S. McKay et al., 1996, "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite," ALH 84001. Wissenschaft 273(5277):1 924- 30, 16. August 1996
11. Thomas Gold, 1992, "The deep, hot biosphere", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 89: 6045-49.

Danksagungen

Die Unterstützung, die ich von Connie Barlow beim Schreiben über dieses vielfältige und vielschichtige Thema erhielt, ist sehr zu schätzen. Ihre Vorschläge trugen dazu bei, meine Ansichten und Ideen in eine leichter verständliche Reihenfolge zu bringen, und sie fügte mehrere wichtige Erklärungen hinzu und fand wesentliche Verweise in meinen umfangreichen Unterlagen.

Ich bin Herrn William Frucht, dem früheren Herausgeber von Copernicus, zu großem Dank verpflichtet, der ein großes Interesse am Thema des massiven Lebens unter der Oberfläche und den zahlreichen Konsequenzen, die dies für verschiedene Zweige der Geowissenschaften haben würde, entwickelte. Er überredete mich, das vorliegende Buch zu schreiben.
Glücklicherweise zeigte der jetzige Chefredakteur von Copernicus, Mr. Jonathan Cobb, ein ebenso starkes Interesse an dem Thema, und seine redaktionelle Feder hatte einen großen Einfluss auf die Kürze und Klarheit der Ausführungen. Ich möchte auch Connie Day für ihre vielen guten Lektoratsvorschläge danken.

Ralph E. Gomory, der Präsident der Alfred P. Sloan Foundation, war ebenfalls begeistert von dem Thema, ebenso wie Dr. Jesse Ausubel, ein Mitarbeiter der Stiftung, und ich weiß es sehr zu schätzen, dass zahlreiche Kosten, die bei der Sammlung der Beweise anfielen, von dieser Stiftung übernommen wurden.

Vor einiger Zeit entdeckte ich, dass ich nicht der Urheber der Theorie eines tiefen Ursprungs des Erdöls war; russische oder ehemalige Sowjetunion-Wissenschaftler hatten sich mehr als ein Jahrhundert lang mit diesen Themen beschäftigt und hatten wirklich große Mengen an Informationen zu ihrer Unterstützung erhalten. Insbesondere Peter Kropotkin (inzwischen verstorben), ein angesehener Geologe im Geologischen Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, war meine Hauptinformationsquelle. Ich war erfreut, von der U.S.S.R.-Akademie gebeten worden zu sein, ein Kapitel zu einem Buch in Erinnerung an Mendelejew beizutragen, der einer der ersten war, der auf eine solche Theorie hinwies.

Die frühere Hilfe meines Freundes und Kollegen Dr. Steven Soter stellte einen wichtigen Beitrag in vielen Bereichen dar, insbesondere in Bezug auf Erdbeben, zu denen er über Jahrhunderte hinweg Augenzeugenberichte aus vielen Ländern gesammelt hatte und mich, indem er mir die Breite der Sichtweisen aufzeigte, sehr ermutigte, die Probleme neu zu durchdenken und die Unzulänglichkeiten vieler allgemein gehaltener Erklärungen zu finden. Bei der Betrachtung des Vorhandenseins riesiger Mengen an unterirdischer Mikrobiologie, die notwendig ist, um biologische Moleküle in allem Erdöl zu erklären, wurde ich von der bemerkenswerten Arbeit von Professor Ourisson und seinen Mitarbeitern in Straßburg, Frankreich, beeinflusst, die nachgewiesen hatten, dass sehr große Mengen an bakteriellen Ablagerungen in den Gesteinen zusammen mit Öl und Gas vorhanden waren, obwohl sie eine andere Erklärung für diese Funde anführten.

Ich möchte auch meiner Frau für die große Geduld danken, die sie an den Tag legte, als ich mich tagelang in mein Arbeitszimmer zurückzog und mein Zeitplan manchmal die geordnete Führung des Haushalts störte.

Index

Seiten Zahlen stimmen nicht